

**ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNOLOGIES**  
**CENTRE ERNEST BABELON**  
**INSTITUT DE RECHERCHE SUR LES ARCHÉOMATÉRIAUX**

**THÈSE** présentée par :

**Guillaume SARAH**

soutenue le : **19 décembre 2008**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université d'Orléans**

Discipline/ Spécialité : Chimie

**Caractérisation de la composition  
et de la structure des alliages argent-cuivre  
par ICP-MS avec prélèvement  
par ablation laser.  
Application au monnayage carolingien**

Volume 1 : Texte

**THÈSE dirigée par :**

**M. Bernard GRATUZE**  
**M. Marc BOMPAIRE**

Directeur de Recherche CNRS, IRAMAT, Orléans  
Directeur de Recherche CNRS, IRAMAT, Orléans

**RAPPORTEURS :**

**M. Koen JANSSENS**  
**M. Olivier BRUAND**

Professeur, Université d'Anvers (Belgique)  
Professeur, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand 2

---

**JURY :**

**M. Jacques POIRIER**  
**Mme Lucile BECK**  
**M. Marc BOMPAIRE**  
**M. Olivier BRUAND**  
**M. Bernard GRATUZE**  
**M. Koen JANSSENS**

Professeur, CEMTHI – Université d'Orléans - Président du jury  
Maître de Conférences, INSTN, Paris  
Directeur de Recherche CNRS, IRAMAT, Orléans  
Professeur, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand 2  
Directeur de Recherche CNRS, IRAMAT, Orléans  
Professeur, Université d'Anvers (Belgique)







« Sans remords dans le passé, confiant dans le présent et plein d'espérance dans l'avenir, il se coucha et s'endormit du sommeil du brave. »



# Remerciements

Ce travail a été réalisé au Centre Ernest Babelon, laboratoire de l'Institut de Recherche sur les Archéomatériaux (IRAMAT) du CNRS. Il a pu être mené à bien grâce à une bourse de docteur-ingénieur du CNRS.

Monsieur Bernard Gratuze, Directeur de Recherche au CNRS, et Directeur du Centre Ernest Babelon et de l'IRAMAT, a été le directeur de cette thèse pendant les trois années qu'a duré ce travail. C'est toutefois durant près de cinq années, pendant lesquelles j'ai pris part aux recherches menées au Centre Ernest Babelon, qu'il m'a fait bénéficier de ses compétences, de ses conseils et de son attention.

Monsieur Marc Bompaire, Directeur de Recherche au CNRS, a été co-directeur de cette thèse. Malgré ma méconnaissance de la numismatique et de l'histoire du haut Moyen Age, il m'a accordé sa confiance pour les recherches liées à l'analyse des monnaies carolingiennes, et pour l'interprétation historique des résultats obtenus pour ces échantillons.

Mes directeur et co-directeur de thèse m'ont permis de développer certains aspects de mon sujet de recherche, avec à la fois une grande liberté et un soutien sans faille. Merci à eux de m'avoir proposé ce sujet qui a pleinement répondu à mes attentes, et pour la confiance qu'ils m'ont témoignée tout au long de ce travail.

Monsieur Jean-Noël Barrandon était le directeur du Centre Ernest Babelon lors de mon arrivée au laboratoire en 2004. C'est à son initiative qu'a été créé ce centre de recherche. J'ai beaucoup appris à son contact ; j'ai particulièrement apprécié la simplicité avec laquelle il m'a fait partager son expérience. Jean-Noël Barrandon nous a quittés prématurément au début de cette année 2008. Je suis heureux d'avoir pu mener à bien un projet de recherche qui combine développement analytique et application historique, selon la vocation originelle du Centre Ernest Babelon telle qu'il l'avait définie.

Mon sujet de recherche m'a été proposé par mes directeur et co-directeur de thèse. Le volet numismatique a été développé conjointement avec Alessia Rovelli, Professeur de l'Université de Viterbe, Cécile Morrisson, Directeur de recherche émérite au CNRS, et Michael McCormick, Professeur de l'Université de Harvard. Je les remercie pour leur disponibilité et pour les échanges fructueux qui ont contribué à approfondir certaines des problématiques développées dans cette thèse.

Je suis profondément reconnaissant à chacun des membres du jury qui m'ont fait l'honneur de s'intéresser à ce travail. Je remercie Messieurs Koen

Janssens, Professeur de l'Université d'Anvers, et Olivier Bruand, Professeur de l'Université de Clermont-Ferrand 2, qui ont accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Je remercie également Madame Lucile Beck, Maître de conférence à l'INSTN, et Monsieur Jacques Poirier, Professeur de l'Université d'Orléans, qui ont participé à ce jury de thèse.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Florian Téreygeol, archéologue minier au Laboratoire Métallurgie et Culture de l'IRAMAT pour sa disponibilité et pour m'avoir fait partager ses connaissances sur les mines et les monnaies de Melle.

Les monnaies analysées dans le cadre de cette thèse proviennent, pour la majorité d'entre elles, de la collection du Cabinet des Médailles de la Bibliothèque nationale de France. Je remercie Michel Amandry, Directeur du département des Monnaies, Médailles et Antiques de cette institution, pour m'avoir permis d'analyser ces pièces. Merci également à Michel Dhénin, Conservateur en chef au Cabinet des Médailles, et Thierry Sarmant, Directeur-adjoint de ce Département, pour leur disponibilité lors de mes visites pour l'accès aux monnaies carolingiennes, ainsi qu'à François Thierry, Conservateur chargé des monnaies orientales, pour les dirhams abbassides.

Je remercie également Jean-Luc Desnier, responsable du médaillier de la Monnaie de Paris, Gildas Salaün et Jacques Santrot, responsable du médaillier et Directeur du musée Dobrée de Nantes, Jean-Paul Bailleul du musée des Mines des rois Francs de Melle, Paul-André Besombes, conservateur à la DRAC de Bretagne, ainsi qu'Arnaud Clairand de la Compagnie Générale de Bourse, pour m'avoir permis d'analyser certains exemplaires de leurs collections.

Mes plus vifs remerciements s'adressent à l'ensemble de mes collègues du Centre Ernest Babelon. Ma reconnaissance va à Maryse Blet-Lemarquand, Alain Giovagnoli et Jean-Claude Rimbault pour leurs conseils et leur disponibilité. Merci à Dominique Lhuillier, en particulier pour l'efficacité de ses relectures, ainsi qu'à Sylvia Nieto-Pelletier, Patricia Roger et Sophie Boucetta. Je remercie également les thésards et stagiaires qui se sont succédés au laboratoire depuis mon arrivée. Merci enfin à mon collègue doctorant Adrien Arles pour son soutien lors de la rédaction de cette thèse.

Je remercie enfin mes parents et ma sœur Emmanuelle pour leur soutien inconditionnel et leurs encouragements.







# Table des Matières

<b>Avant-Propos.....</b>	<b>11</b>
<b>Développement du protocole d'analyse des monnaies d'argent par LA-ICP-MS .....</b>	<b>19</b>
<b>A. Les monnaies anciennes en argent.....</b>	<b>21</b>
I. Caractéristiques de composition des monnaies d'argent.....	21
1. Présentation générale.....	21
2. Caractéristiques physico-chimiques des alliages argent-cuivre.....	22
II. L'enrichissement de la surface.....	24
1. Présentation du phénomène .....	24
2. Causes de l'enrichissement de surface .....	29
3. Etudes antérieures spécifiques à l'enrichissement de surface.....	33
a. Observations générales .....	33
b. Implications pour l'analyse des monnaies d'argent.....	35
III. Les méthodes d'analyse antérieures .....	37
1. Les méthodes d'analyse de surface .....	38
a. La microscopie électronique à balayage couplé à un détecteur de rayons X en dispersion d'énergie et la microsonde de Castaing.....	38
b. Le PIXE.....	39
c. La spectrométrie de fluorescence X.....	40
2. Les méthodes d'analyse semi-globale et globale.....	42
a. L'activation protonique.....	42
b. L'activation neutronique.....	44
IV. Solutions proposées antérieurement pour s'affranchir de l'enrichissement de la surface en argent.....	47
V. Implications pour l'analyse des monnaies d'argent .....	49
<b>B. La mise au point du protocole d'analyse des monnaies d'argent par LA-ICP-MS....</b>	<b>50</b>
I. La méthode LA-ICP-MS .....	50
1. Principe de la méthode LA-ICP-MS .....	51
a. L'ablation laser .....	51
b. La cellule d'ablation .....	52
c. L'ionisation du micro-prélèvement.....	52
d. Le transfert de l'échantillon vers le spectromètre de masse .....	53
e. Le tri des ions.....	55
f. La détection des ions .....	56
g. L'acquisition des données.....	57
h. Le calcul des concentrations .....	58
II. Mise au point du protocole analytique.....	61
1. La méthode LA-ICP-MS en archéométrie.....	61
2. L'analyse des métaux par LA-ICP-MS .....	63
3. La cellule d'ablation laser .....	64
4. L'analyse des éléments majeurs en profils de concentration.....	68
a. Les profils de concentration par LA-ICP-MS dans la littérature .....	69

b. Définition des paramètres analytiques pour la caractérisation des éléments majeurs en profils de concentration .....	69
5. L'analyse des éléments mineurs et traces .....	100
a. Les éléments dosés .....	100
b. Le choix des isotopes .....	101
c. Le mode d'acquisition des données .....	103
d. Les paramètres de l'ablation laser .....	104
e. Le calcul des concentrations .....	106
f. Les alliages de référence .....	107
g. Les limites de détection .....	108
6. Déroulement d'une séance d'analyse de monnaies d'argent .....	109
<b>C. Validation du protocole analytique .....</b>	<b>111</b>
I. L'analyse des alliages de référence par Activation aux Neutrons Rapides de Cyclotron .....	111
II. La précision des mesures .....	113
1. L'analyse des alliages de référence utilisés dans le menu d'analyse des éléments majeurs .....	114
a. Les alliages binaires argent-cuivre purs .....	114
b. Les alliages argent-cuivre contenant les cinq éléments mineurs principaux .....	116
2. L'analyse des alliages de référence utilisés dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces .....	120
III. Les analyses de coupes de monnaies .....	124
1. Les analyses par LA-ICP-MS .....	124
2. Comparaison des analyses par LA-ICP-MS avec d'autres méthodes .....	126
IV. La représentativité des analyses .....	127
1. L'analyse des éléments majeurs en profils de concentration .....	127
a. L'argent .....	128
b. Les cinq éléments mineurs principaux .....	139
c. Conclusion .....	153
2. L'analyse des éléments mineurs et traces .....	154
3. La reproductibilité de l'analyse complète de monnaies anciennes .....	158
V. Comparaison avec l'analyse par ANRC .....	160
1. L'argent .....	160
2. Les autres éléments dosés par les deux méthodes .....	165
a. Le zinc .....	165
b. L'arsenic .....	166
c. L'étain .....	167
d. L'or .....	168
e. Le plomb .....	169
VI. Limitations .....	170
<b>D. Bilan de l'analyse des monnaies d'argent par LA-ICP-MS .....</b>	<b>172</b>
<b>Liste des références de la Première partie .....</b>	<b>175</b>
<b>Application au monnayage carolingien .....</b>	<b>187</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>191</b>
<b>A. Le contexte historique .....</b>	<b>198</b>

<b>B. La numismatique des premiers carolingiens.....</b>	<b>201</b>
I. Généralités .....	201
II. Les ouvrages de référence .....	205
<b>C. Les types monétaires étudiés .....</b>	<b>210</b>
I. La définition du cadre chronologique .....	210
II. Présentation des types monétaires étudiés .....	212
1. Nomenclature .....	212
2. Le découpage chronologique.....	213
3. Pépin le Bref (751-768).....	215
4. Carloman (768-771) .....	218
5. Charlemagne (768-814).....	218
a. Charlemagne Type 1 (768-771).....	218
b. Charlemagne Type 2 (771-793/4).....	219
c. Louis roi d'Aquitaine (781-793/4).....	223
d. Charlemagne Type 3 (793/4-812).....	224
e. Charlemagne Type 4 (812-814).....	227
6. Louis le Pieux (814-840).....	228
a. Louis le Pieux Type 1 (814-818).....	228
b. Louis le Pieux Type 2 (818-822/3).....	230
c. Louis le Pieux Type 3 (822/3-840).....	235
7. Pépin I <sup>er</sup> d'Aquitaine (817-838).....	237
8. Pépin II d'Aquitaine (839-852) .....	238
9. Lothaire (840-855) .....	241
10. Charles le Chauve (840-877).....	246
a. Charles le Chauve Première période (840-864).....	246
b. Charles le Chauve Deuxième période (864-877).....	251
c. Les monnaies impériales de Charles le Chauve (876-877).....	254
11. Les monnaies vénitiennes frappées au type carolingien.....	254
a. Les monnaies vénitiennes du Type 2 de Louis le Pieux (818-822/3).....	254
b. Les monnaies supposées vénitiennes du Type 3 de Louis le Pieux (822/3-840).....	255
c. Le Type Xpe Salva Venecias (822/3-840 ?).....	256
d. Les monnaies vénitiennes au nom de Lothaire (840-855).....	257
12. Les émissions d'or.....	259
<b>D. Le corpus des monnaies analysées .....</b>	<b>259</b>
I. Pépin le Bref (751-768) .....	259
II. Carloman (768-771) .....	263
III. Charlemagne (768-814).....	263
1. Charlemagne Type 1 (768-771).....	263
2. Charlemagne Type 2 (771-793/4) .....	264
3. Louis roi d'Aquitaine (781-793/4) .....	267
4. Charlemagne Type 3 (793/4-812) .....	267
5. Charlemagne Type 4 (812-814).....	271
IV. Louis le Pieux (814-840).....	272
1. Louis le Pieux Type 1 (814-818).....	272
2. Louis le Pieux Type 2 (818-822/3).....	273
3. Louis le Pieux Type 3 (822/3-840).....	274
V. Pépin I <sup>er</sup> d'Aquitaine (817-838) .....	275
VI. Pépin II d'Aquitaine (839-852).....	275
VII. Lothaire (840-855).....	275
VIII. Charles le Chauve (840-877).....	277
1. Charles le Chauve Première période (840-864).....	277

2. Charles le Chauve Deuxième période (864-877).....	278
3. Les monnaies impériales de Charles le Chauve (876-877).....	278
4. Les monnaies de Charles le Chauve au monogramme carolin (840-877) .....	278
IX. Les monnaies au monogramme carolin de période d'attribution incertaine.....	279
X. Les monnaies vénitiennes frappées au type carolingien.....	283
1. Les monnaies vénitiennes du Type 2 de Louis le Pieux (818-822/3).....	283
2. Les monnaies supposées vénitiennes du Type 3 de Louis le Pieux (822/3-840).....	283
3. Le Type <i>Xpe Salva Venecias</i> (822/3-840 ?) .....	283
4. Les monnaies vénitiennes au nom de Lothaire (840-855).....	283
XI. Les émissions d'or .....	284
<b>E. De la représentativité du <i>corpus</i> des monnaies analysées .....</b>	<b>284</b>
<b>F. Les analyses antérieures.....</b>	<b>286</b>
I. Recensement des analyses antérieures.....	287
II. Regard critique sur les analyses antérieures .....	295
<b>G. Interprétation des résultats des analyses .....</b>	<b>298</b>
I. Les fausses monnaies.....	298
II. L'évolution du titre d'argent.....	308
1. Pépin le Bref (751-768).....	309
2. Carloman (768-771).....	312
3. Charlemagne (768-814).....	312
a. Charlemagne Type 1 (768-771).....	312
b. Charlemagne Type 2 (771-793/4).....	313
c. Louis roi d'Aquitaine (781-793/4).....	318
d. Charlemagne Type 3 (793/4-812).....	319
e. Charlemagne Type 4 (812-814).....	322
4. Louis le Pieux (814-840).....	323
a. Louis le Pieux Type 1 (814-818).....	323
b. Louis le Pieux Type 2 (818-822/3).....	324
c. Louis le Pieux Type 3 (822/3-840).....	328
5. Pépin I <sup>er</sup> d'Aquitaine (817-838).....	331
6. Pépin II d'Aquitaine (839-852).....	332
7. Lothaire (840-855).....	335
8. Charles le Chauve (840-877).....	341
a. Charles le Chauve Première période (840-864).....	341
b. Charles le Chauve Deuxième période (864-877).....	348
c. Les monnaies impériales de Charles le Chauve (876-877).....	350
d. Les monnaies de Charles le Chauve au monogramme carolin (840-877).....	350
9. Les monnaies au monogramme carolin de période d'attribution incertaine.....	354
III. Les éléments mineurs et traces.....	356
1. L'évolution des teneurs globales en éléments mineurs et traces .....	356
2. Des particularités propres à certains types monétaires .....	360
a. Pépin le Bref (751-768).....	360
b. Charlemagne Première période : Types 1 et 2 (768-771 et 771-793/4).....	361
c. Pépin II d'Aquitaine (839-852).....	362
d. Lothaire (840-855) et Charles le Chauve Première période (840-864).....	362
IV. Des problématiques spécifiques.....	364
1. Les oboles.....	364
a. Le titre d'argent des oboles : comparaison avec les deniers .....	364
b. Les éléments mineurs et traces .....	369
2. Les monnaies de Melle.....	370
a. Un atelier particulier .....	370

b. Une typologie complexe .....	371
c. Le titre d'argent .....	377
d. Les analyses des rapports isotopiques du plomb .....	399
3. Les monnaies au monogramme carolin de période d'attribution incertaine .....	401
a. Le titre d'argent .....	402
b. Les éléments mineurs et traces .....	403
4. Les <i>emporia</i> du Nord : Dorestad et Quentovic .....	406
5. Les émissions italiennes .....	407
a. Le titre d'argent .....	409
b. Les éléments mineurs et traces .....	413
6. Venise.....	413
a. Le titre d'argent .....	414
b. Les éléments mineurs et traces .....	421
c. Les analyses des rapports isotopiques du plomb.....	427
d. Des perspectives « piréniennes » ? .....	429
e. Les analyses de monnaies arabes .....	432
f. Encore Pirenne .....	441
<b>H. Bilan de l'analyse des monnaies carolingiennes et perspectives .....</b>	<b>444</b>
<b>Liste des références de la Deuxième partie.....</b>	<b>451</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>463</b>





## Avant-Propos

Les recherches menées dans le cadre de cette thèse concernent l'analyse des monnaies anciennes en argent par LA-ICP-MS (spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif avec prélèvement par ablation laser).

Le laboratoire d'accueil, le Centre Ernest Babelon, constitue un environnement privilégié pour une telle étude. Depuis sa création en 1980, ce centre de recherche s'est spécialisé dans le développement de méthodes non destructives de caractérisation physico-chimiques des métaux monnayés, et à leur application à des problématiques numismatiques et historiques. Des nouvelles méthodes d'analyse spécifiquement étudiées pour ces applications ont été développées. Cette approche originale a permis d'apporter des éléments de réflexion novateurs de première importance pour répondre à des questions historiques et économiques.

L'originalité du Centre Ernest Babelon est la réunion au sein d'un même laboratoire de physico-chimistes, et de numismates et historiens pour l'étude de problématiques liées à l'histoire économique et monétaire à travers la composition des monnaies. Le chimiste spécialisé dans une ou plusieurs méthodes connaît les matériaux anciens qu'il est amené à caractériser ; le spécialiste des monnaies est détenteur de connaissances liées au contexte de fabrication, d'utilisation et de circulation de ses objets d'étude. Chacun d'eux doit intégrer les notions de la discipline qui n'est pas celle de sa formation pour que les recherches soient les plus fructueuses. C'est l'enrichissement mutuel qui résulte de cette collaboration qui constitue le caractère unique du Centre Ernest Babelon.

La finalité de cette thèse est double. D'une part, la mise au point d'un protocole d'analyse des monnaies d'argent par LA-ICP-MS ; d'autre part, l'application de cette méthode à une problématique historique : celle de l'argent carolingien. Les deux spécificités du Centre Ernest Babelon se trouvent donc réunies dans cette recherche : un volet analytique, dédié à la caractérisation d'un type d'alliage monétaire par une méthode qui n'a pas encore été employée avec cette finalité ; un volet numismatique, qui s'inscrit dans une problématique historique précise.

Ces deux finalités peuvent sembler éloignées, et ne présenter d'autre point commun que celui de la méthode. Dans les faits, chacune des deux problématiques a constamment alimenté l'autre : la diversité de composition et de structure des monnaies carolingiennes offre à la partie analytique un support d'étude complexe, qui permettra d'aborder par la suite l'analyse de *corpus* monétaires divers ; la

méthode LA-ICP-MS, par ses caractéristiques intrinsèques, et celles du protocole spécifique développé pour l'analyse des monnaies d'argent, offrent les meilleures bases pour l'interprétation historique des résultats. Ce n'est qu'à mesure que le nombre de monnaies carolingiennes analysées augmentait, que sont apparues des problématiques analytiques précises qui ont suggéré d'ajuster certains paramètres.

Le développement du protocole analytique spécifique aux monnaies d'argent par LA-ICP-MS est indispensable pour que la problématique de l'analyse des pièces carolingiennes soit étudiée dans les meilleures conditions. Les méthodes d'analyse des monnaies d'argent utilisées jusqu'à maintenant, quelles qu'en soient les caractéristiques, présentent l'inconvénient principal de ne pas tenir compte de variations de composition entre la surface et l'intérieur qui affectent ces échantillons. Le caractère imprévisible de ce phénomène impose sa prise en compte lors de l'analyse, pour que la fiabilité des résultats soit la meilleure. C'est dans cette optique qu'a été entreprise l'application de la méthode LA-ICP-MS aux monnaies d'argent. Les caractéristiques intrinsèques de cette méthode justifient son intérêt pour résoudre cette problématique. La première partie de cette thèse présente les recherches menées dans ce but : les caractéristiques de composition et de structure des monnaies d'argent y sont étudiées, et celles de la méthode LA-ICP-MS présentées. La combinaison des spécificités des objets d'étude et de la méthode employée a permis la définition de paramètres analytiques spécifiques. Un protocole d'analyse dédié à l'analyse des éléments majeurs dans les monnaies d'argent par LA-ICP-MS a été développé, ainsi qu'un autre spécifique au dosage des éléments mineurs et traces contenus dans ces alliages. Des analyses ont enfin été pratiquées par d'autres méthodes, afin de valider la pertinence de l'approche proposée et de s'assurer de la fiabilité des résultats obtenus par LA-ICP-MS.

Les pièces carolingiennes constituent l'essentiel du *corpus* qui a servi de support au développement du protocole d'analyse des monnaies d'argent par LA-ICP-MS. Au-delà de l'intérêt de ces échantillons pour le volet analytique de cette thèse, la caractérisation de ce monnayage s'inscrit dans la problématique de la frappe, de la circulation et de l'approvisionnement en argent en Occident durant le haut Moyen Age. Les monnaies des premiers Carolingiens étudiées proviennent, pour la plupart, du Cabinet de Médailles de la Bibliothèque nationale de France. Ce sont près de cinq cents exemplaires frappés entre 751 et 877 qui ont été analysés dans le cadre de cette thèse. Les résultats analytiques obtenus pour ces pièces ont été examinés selon deux aspects : la pureté d'argent ou titre d'une part, et les teneurs en éléments mineurs et traces d'autre part. L'évolution du titre d'argent a été étudiée pour les pièces de notre *corpus*, aux noms de Pépin le Bref, de

Charlemagne et de Louis le Pieux pour l'essentiel, frappées autour de 800. Les teneurs de certains éléments mineurs et traces, susceptibles de servir de traceurs des métaux précieux, ont été examinées pour tenter d'apporter de nouveaux éléments de réflexion à la question de l'origine de l'argent carolingien. Les résultats analytiques ont été mis en relation avec les données numismatiques et le contexte historique afin de formuler des hypothèses de travail et de proposer des pistes pour des recherches futures.



**Première partie :**

**Développement du protocole d'analyse  
des monnaies d'argent par LA-ICP-MS**



## **A. Les monnaies anciennes en argent**

En archéométrie comme dans toute autre discipline, une analyse fiable et pertinente passe par une bonne connaissance du matériau que l'on souhaite caractériser. La finalité de la première partie de cette thèse est la définition de paramètres expérimentaux pour l'analyse des monnaies anciennes à base d'argent par LA-ICP-MS ; de ce fait, il est indispensable de commencer par détailler les caractéristiques de composition et de structure de ce type d'échantillons en préalable au développement du protocole analytique.

### **I. Caractéristiques de composition des monnaies d'argent**

#### **1. Présentation générale**

L'appellation « monnaie d'argent », telle qu'elle a été utilisée par le passé par les numismates, désigne des alliages dont la composition peut être très différente. D'une manière générale, il s'agit d'alliages argent-cuivre dont le titre de métal blanc peut varier de près de 100 % pour les plus purs jusqu'à 10 à 20 % seulement pour les pièces de billon. Ces alliages contiennent en outre un grand nombre d'éléments mineurs et traces, dont les teneurs peuvent varier, selon les éléments et selon les monnaies, de quelques fractions de ppm à plusieurs pourcents. Le plus souvent, ces éléments mineurs et traces sont des impuretés de l'argent et du cuivre alliés ensemble pour obtenir la composition voulue. Le dosage de ces impuretés peut servir à caractériser des sources de métal différentes, et donc permettre de distinguer des stocks d'argent qui n'ont pas la même origine. Leur provenance peut être déterminée dans les cas les plus favorables (Barrandon *et al.*, 1991 ; Barrandon *et al.*, 1992 ; Guerra, 2004 ; Le Roy Ladurie *et al.*, 1990 ; Morrison *et al.*, 1999).

L'analyse des monnaies anciennes en argent doit ainsi se faire dans l'optique de permettre une interprétation des résultats analytiques sur deux plans : d'une part, le dosage des constituants majeurs des monnaies, et donc de l'argent, dont l'évolution peut par exemple être suivie selon les dates d'émission des exemplaires étudiés ; d'autre part, le dosage des éléments mineurs et traces, dont certains sont susceptibles d'être utilisés pour des études de provenance des métaux précieux constituant les alliages monétaires.

L'alliage de cuivre à l'argent peut avoir, selon les périodes et les visées des souverains et monnayeurs, plusieurs explications : l'ajout de quelques pourcents de métal rouge au métal blanc peut servir à durcir légèrement l'alliage (Clairand et Kind, 2000). Des pièces très fines peuvent ainsi être rigidifiées afin d'éviter

qu'elles soient détériorées durant leur circulation (Meyers *et al.*, 1974). Cela peut également permettre que les monnaies ne soient pas refondues, et que le métal soit utilisé à d'autres fins par exemple en bijouterie, sans qu'il soit nécessaire de le purifier (Clairand et Kind, 2000). Dans les autres cas, l'adjonction d'une quantité plus ou moins importante de cuivre, ou parfois de bronze ou de laiton, sert à affaiblir la valeur intrinsèque de la monnaie.

En dehors de leurs caractéristiques de composition, la principale spécificité des monnaies anciennes en argent est ce que l'on appelle l'enrichissement de surface. Ce phénomène se traduit par des variations de composition des alliages monétaires entre l'intérieur et la couche superficielle. La teneur en argent de l'alliage est ainsi fréquemment plus élevée à la surface des pièces. Ces différences de composition doivent être prises en compte par l'analyste pour une caractérisation la plus fidèle possible de la composition des échantillons. Les caractéristiques de l'enrichissement de surface, les causes possibles et les implications de ce phénomène pour l'analyse des monnaies sont développées plus loin dans cette première partie (voir *infra* p. 24 et suivantes).

## 2. Caractéristiques physico-chimiques des alliages argent-cuivre

L'étude du diagramme de phase argent-cuivre en préalable à l'analyse de monnaies d'argent est riche d'enseignements (Figure 1).

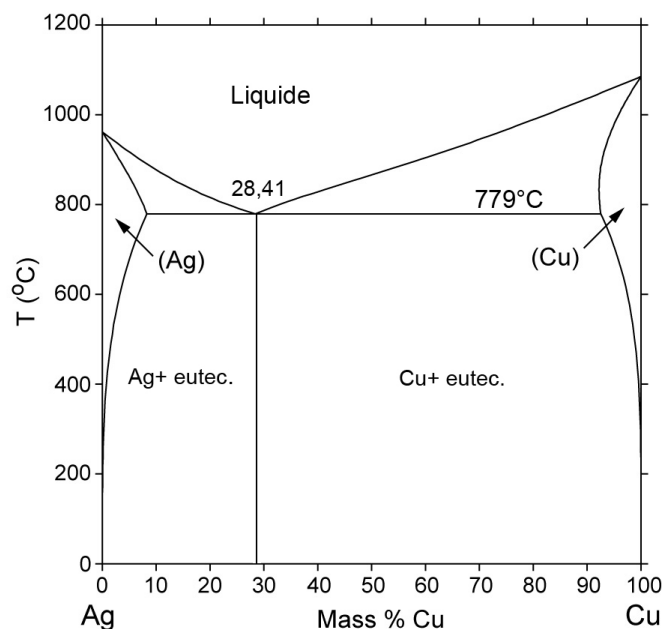


Figure 1 - Diagramme de phase Ag-Cu. D'après Smithells 1976.



Trois zones qui concernent les alliages solides de ces deux métaux se distinguent sur ce diagramme.

La première se rapporte aux alliages argent-cuivre qui contiennent 7,47 % d'argent ou moins. Pour de telles compositions, l'argent et le cuivre forment une phase unique constituée majoritairement de cuivre, et dont le comportement chimique est identique à celui d'un corps pur. Cette zone ne nous intéresse pas ici puisque les recherches menées dans le cadre de cette thèse concernent les monnaies constituées majoritairement d'argent.

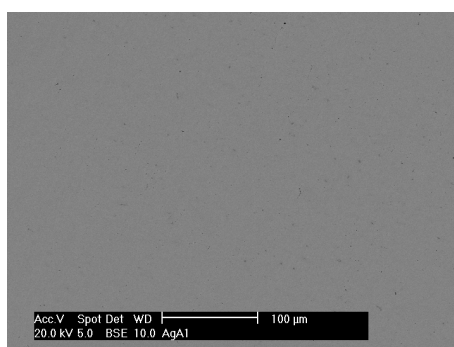
La situation pour les alliages contenant plus de 91,73 % de métal blanc est inverse de celle décrite précédemment : l'alliage est cette fois encore monophasé, et présente des propriétés chimiques identiques à celles d'un corps pur, mais c'est alors le cuivre minoritaire qui est contenu dans une phase à base d'argent. Une part importante des monnaies analysées dans le cadre de cette étude entre dans cette catégorie de composition.

Les alliages dont la teneur en argent est comprise entre 7,47 % et 91,73 % présentent une structure biphasée. Une phase eutectique de composition massique Ag-Cu 71,59-28,41 est mélangée à une phase composée majoritairement d'argent si l'alliage global contient plus d'argent que le mélange eutectique, ou majoritairement de cuivre si ce dernier élément est le constituant principal de l'alliage (Beck *et al.*, 2004 ; Condamin et Picon, 1964a).

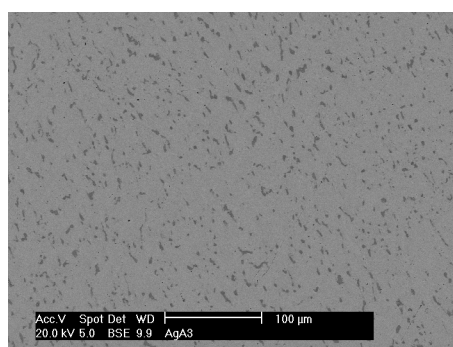
Les images présentées sur la Figure 2 ont été obtenues par microscopie électronique à balayage en mode électrons rétrodiffusés (BSE) sur des alliages binaires Ag-Cu dont les teneurs en argent varient entre 60 % et 97 %. Ces alliages modernes sont utilisés dans le protocole d'analyse des éléments majeurs en tant que matériaux de référence. Leurs teneurs en argent et en cuivre sont certifiées par le fabricant.

L'observation des images de microscopie électronique converge avec l'interprétation du diagramme de phase. Ainsi l'alliage RAgA1, dont la teneur en argent est supérieure à 91,73 %, ne présente qu'une unique phase : les quelques pourcents de cuivre qu'il contient sont mélangés à l'argent.

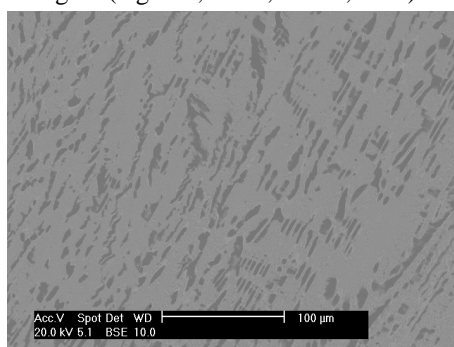
Pour les 3 autres alliages, dont la teneur en argent est légèrement inférieure à 91,73 % (RAgA3) ou plus largement (RAgA4 et RAgA5), deux phases sont visibles : la plus claire, caractéristique d'un numéro atomique moyen plus élevé, est majoritairement constituée d'argent ; la plus foncée contient davantage de cuivre.



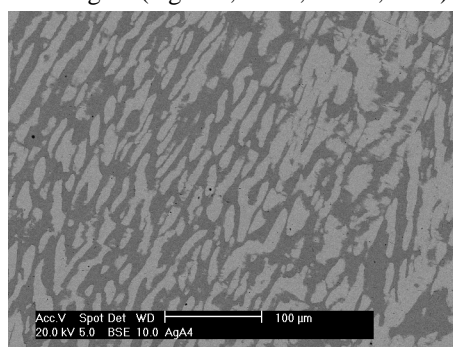
RAgA1 (Ag : 96,94 % ; Cu : 3,03 %)



RAgA3 (Ag : 91,50 % ; Cu : 8,47 %)



RAgA4 (Ag : 79,94 % ; Cu : 20,03 %)



RAgA5 (Ag : 59,89 % ; Cu : 40,10 %)

**Figure 2** - Observation en microscopie électronique à balayage en mode électrons retrodiffusés des phases d'alliages binaires Ag-Cu modernes de diverses compositions.

Le problème de la représentativité de l'analyse ne se pose théoriquement pas dans le cas des alliages dont la teneur en argent est supérieure à 91,73 % : leur structure monophasée doit permettre d'obtenir une composition représentative de l'ensemble de l'alliage quel que soit le volume d'investigation caractéristique de la méthode employée. La structure biphasée des alliages doit en revanche être prise en compte pour des monnaies contenant moins de 91,73 % d'argent : la taille de la zone analysée doit être adaptée afin de ne pas être tributaire des variations de composition que l'on observe à l'échelle des phases qui constituent l'alliage.

## II. L'enrichissement de la surface en argent

### 1. Présentation du phénomène

La principale caractéristique des monnaies anciennes à base d'argent est ce que l'on appelle dans la littérature le phénomène d'enrichissement de surface.

Les alliages monétaires à base d'or peuvent présenter de légères hétérogénéités de composition selon la profondeur. Ces variations ne concernent

toutefois qu'une épaisseur de quelques micromètres ; il est donc possible de considérer qu'elles n'ont pas d'influence sur la caractérisation des pièces.

Les monnaies d'argent présentent en revanche fréquemment des hétérogénéités de composition importantes entre intérieur et surface. La caractérisation de ces monnaies doit donc se faire en tenant compte de ces hétérogénéités.



**Figure 3** - Coupe de monnaie présentant une couche superficielle enrichie en argent.

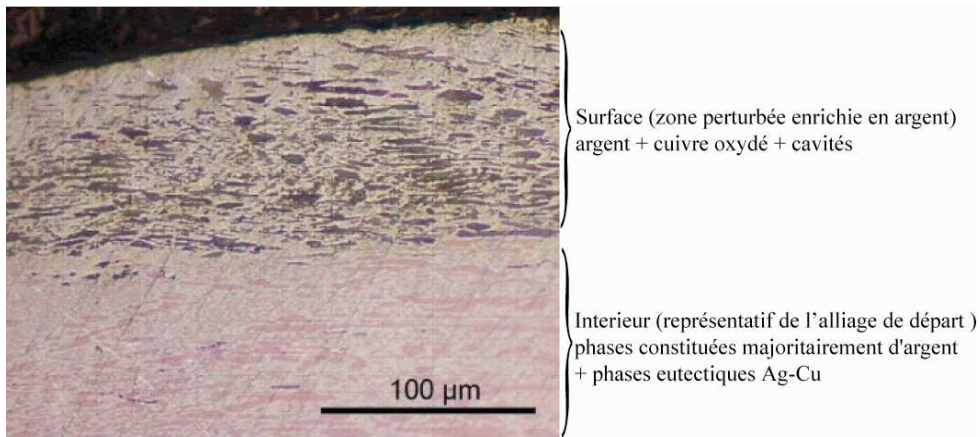
Le phénomène d'enrichissement de surface des monnaies d'argent est visible sur la Figure 3 : l'échantillon observé présente sur sa coupe une couche superficielle d'épaisseur variable. La composition de l'alliage présent en surface diffère de celle du cœur de la monnaie sur une épaisseur qui peut atteindre voire excéder 200  $\mu\text{m}$  sur chaque face. Or, c'est la composition de la partie intérieure de la pièce (« alliage sain »), située sous la couche superficielle, qu'il convient de caractériser. Cette composition correspond en effet à celle de l'alliage tel qu'il a été fondu par le monnayeur ancien.

Ces variations de teneurs compliquent la tâche de l'analyste qui souhaite caractériser ces monnaies. Toute la difficulté de l'analyse des pièces anciennes en argent consiste donc à déterminer la composition de l'alliage sain situé sous la couche de surface perturbée, sans causer de dommages visibles aux échantillons.

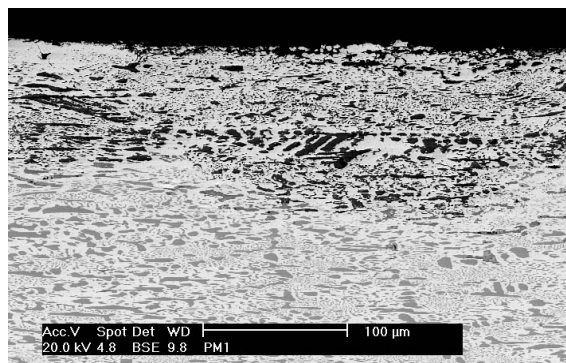
L'argent et le cuivre sont les deux éléments principalement affectés par ces variations de composition. L'amplitude de variation des teneurs est très variable selon les échantillons et imprévisible. La couche de surface perturbée contient toutefois, d'une manière générale, davantage d'argent et moins de cuivre que l'alliage sain. Les teneurs des éléments mineurs et traces peuvent également évoluer de manière différente en surface et à l'intérieur de la monnaie (Carter, 1973 ; Schweizer, 1972 ; Smit et Kos, 1984 ; Tate, 1986).

Les causes possibles de l'enrichissement de surface ainsi que les implications de ces phénomènes sont présentées plus loin. Les Figures 4 et 5, images de microscopie optique et de microscopie électronique à balayage,

constituent une première approche pour appréhender ce phénomène. Ces deux figures ont été réalisées à partir de coupes polies de monnaies indiennes dites « à poinçons multiples » d'un titre de l'ordre de 70 % d'argent.



**Figure 4** - Observation en microscopie optique de la structure superficielle sur une coupe de monnaie.



**Figure 5** - Observation en microscopie électronique à balayage en mode électrons rétrodiffusés de la structure superficielle et de la répartition des phases sur une coupe de monnaie.

L'exemplaire qui apparaît sur la Figure 4 présente une couche superficielle relativement homogène, d'une épaisseur de l'ordre de 100 µm. Cette couche de surface contient des cavités laissées par le cuivre oxydé éliminé à la surface de la monnaie. Ces cavités, à l'instar des phases eutectiques contenues dans la matrice d'argent de l'alliage sain, présentent un faciès longiligne caractéristique du travail effectué pour déformer l'alliage de départ. La chaîne opératoire incluait probablement la mise en forme de lames, puis de carreaux, de flans, et enfin de monnaies frappées, comme cela se faisait au Moyen Age en Occident avant l'introduction de la frappe au balancier (Arles, 2008 ; Arles *et al.*, 2005).

La Figure 5 présente une image obtenue par microscopie électronique à balayage en mode électrons rétrodiffusés sur une coupe de monnaie ancienne. Les mêmes phénomènes que sur la Figure 4 peuvent être observés, l'information du

contraste de numéro atomique en plus. Les phases les plus claires, caractéristiques d'un Z plus élevé, sont constituées majoritairement d'argent, tandis que les plus foncées contiennent davantage de cuivre, dont le numéro atomique est plus faible.

L'épaisseur de la couche de surface enrichie en argent semble plus variable sur cet échantillon que sur le précédent, de 70 à 120  $\mu\text{m}$  environ. La teneur moyenne en argent dans cette couche est de 80 % alors que celle de l'alliage sain n'est que de 63 %, d'après l'analyse de zones représentatives par microscopie électronique à balayage couplée à un détecteur de rayons X.

Les expressions « *enrichissement de la surface en argent* » – en anglais « *near-surface silver enrichment* », (Condamine et Picon, 1964a ; Klockenkämper *et al.*, 1999) –, ou plus simplement « *enrichissement de surface* » – « *surface enrichment* », (Beck *et al.*, 2004 ; Hall, 1960 ; Hall, 1961) – ont été utilisées par le passé pour désigner les variations de composition entre intérieur et surface des monnaies. Mais si ces dénominations ne sont pas inexactes, nous tenons néanmoins à attirer l'attention sur le fait qu'elles se rapportent à l'argent et non au cuivre. Or, c'est ce dernier élément qui est à l'origine des phénomènes observés. L'enrichissement en argent de la surface des monnaies n'est que relatif.

C'est en effet au départ du cuivre oxydé, durant la mise en forme des monnaies comme après leur enfouissement, que doit être imputé l'enrichissement en argent de la proche surface des alliages monétaires. L'expression « enrichissement de surface » désigne donc la conséquence de ce phénomène, du point de vue du principal constituant des alliages qu'est l'argent. De ce fait, une telle désignation peut sembler inexacte. Ce sera néanmoins celle que nous adopterons, à la fois par souci de cohérence avec les publications antérieures, et aussi parce que l'expression « enrichissement de surface » fait référence au principal constituant des monnaies sur lequel est basée l'interprétation historique des résultats.

Seul par le passé Carter s'est placé du point de vue de l'élément véritablement à l'origine des variations de composition observées actuellement, à savoir le cuivre, employant « *surface depletion* » (Carter, 1964).

Une autre mise au point concernant l'enrichissement de la surface des monnaies en argent nous semble nécessaire. Cette expression, ou une autre équivalente, dont nous venons de discuter le sens et l'emploi, est utilisée pour désigner les conséquences de phénomènes intervenant durant la mise en forme et après l'enfouissement des monnaies. Des expérimentations récentes ont démontré que ces phénomènes, s'ils ont pu être exploités délibérément pour donner un aspect

argenté à des pièces de billon (Arles *et al.*, 2005), semblent toutefois inévitables. Ainsi, des monnaies ont pu présenter un léger enrichissement de surface à la sortie de l'atelier monétaire sans pour autant que le monnayeur ait spécifiquement travaillé l'alliage dans le but d'enrichir en argent sa surface et de lui conférer un aspect argenté.

Un tel phénomène ne peut donc en aucun cas être assimilé à une argentine : c'est bien le départ du cuivre oxydé en surface qui est à l'origine de l'enrichissement relatif de la surface en argent, et non le dépôt d'une couche d'argent pur. De ce fait, l'enrichissement de surface ne peut être considéré comme une procédure d'argente, contrairement aux techniques de dépôt de feuille mince ou d'amalgame de mercure (La Niece, 1993).

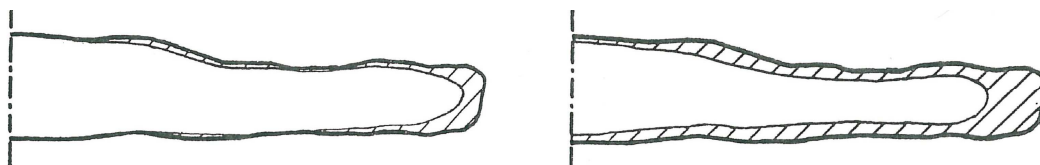
Les monnaies anciennes constituées d'un alliage argent-cuivre sont celles qui présentent les plus grandes variations de composition entre la frappe et l'analyse (Condamine et Picon, 1972).

Les premières mentions de l'enrichissement en argent de la surface de ces monnaies remontent au début des années 1960 (Carter, 1964 ; Condamine et Picon, 1964a ; Guey, 1962 ; Guey et Condamine, 1961 ; Hall, 1960 ; Hall, 1961). L'enrichissement de surface est alors apparu comme une limitation pour les analyses de pièces d'argent par des méthodes de surface comme la spectrométrie de fluorescence X, dont l'application à des objets archéologiques se développait alors. L'emploi d'une telle méthode, qui ne caractérise que la très proche surface des monnaies (i.e. quelques dizaines de micromètres), induit en effet un risque important de surestimation du titre d'argent du fait de l'enrichissement de surface.

Certains utilisateurs de méthodes de surface ont ainsi par la suite étudié spécifiquement l'enrichissement de la surface des monnaies en argent dans le but de proposer des solutions pour s'en affranchir (voir *infra* p.47). Nous verrons plus loin dans un paragraphe spécifique si ces tentatives ont été couronnées de succès.

Les études les plus exhaustives de l'enrichissement de surface sont celles de Condamine et Picon parues entre 1964 et 1972 (Condamine et Picon, 1964a ; Condamine et Picon, 1964b ; Condamine et Picon, 1965 ; Condamine et Picon, 1972). C'est également à ces auteurs que l'on doit le meilleur énoncé des problématiques liées à l'analyse des monnaies d'argent et à l'enrichissement de surface : « *En analyse, deux questions essentielles se posent : quelle correspondance existe-t-il entre taux superficiel et taux global, et entre taux actuel et taux primitif ?* » (Condamine et Picon, 1964a). C'est en s'attendant à répondre à ces questions que ces chercheurs ont en particulier mis en évidence que l'enrichissement de surface des monnaies d'argent n'est pas seulement source d'erreur pour les méthodes d'analyse

superficielle, mais également pour les méthodes d'analyse globale : les schémas de coupes de monnaies présentés par ces auteurs d'après leurs observations (Condamin et Picon, 1964b), et qui sont repris ici tant ils nous semblent explicites, le démontrent clairement (Figure 6).



**Figure 6** - Schémas de coupes de monnaies d'argent présentant une couche superficielle enrichie en argent. D'après (Condamin et Picon, 1964b).

Les travaux réalisés sur des coupes de monnaies anciennes ont également révélé que les éléments mineurs principaux contenus dans les pièces d'argent que sont l'or, le plomb et l'étain, sont également affectés par les phénomènes d'enrichissement de surface. Ainsi, le comportement du premier serait similaire à celui de l'argent et sera donc enrichi en surface. Les deux autres verraient leur concentration amoindrie dans cette zone, à l'instar du cuivre (Condamin et Picon, 1972). Les mêmes observations ont été faites par Carter (Carter, 1964).

Condamin et Picon ont relevé des écarts entre teneurs en surface et à l'intérieur de la monnaie jusqu'à un facteur dix pour l'étain ; selon ces mêmes chercheurs, les rapports de concentrations entre les différents éléments mineurs et traces varient selon la profondeur du fait des phénomènes de diffusion (Condamin et Picon, 1964a). De plus, les travaux de Condamin et Picon semblent démontrer que c'est la création d'un gradient de concentration en cuivre entre l'intérieur et la surface des monnaies durant la mise en forme qui est l'amorce des phénomènes ultérieurs de diffusion solide du cuivre métallique, qui s'oxyde en surface puis est éliminé (Condamin et Picon, 1964b).

## **2. Causes de l'enrichissement de surface**

La première cause possible d'enrichissement relatif en argent de la surface des monnaies apparaît durant leur mise en forme. Plusieurs phénomènes peuvent expliquer la migration de l'argent vers la surface et l'élimination du cuivre dans cette zone : le refroidissement différentiel des phases constituées en majorité d'argent ou de cuivre, les passes successives de déformation mécanique durant la mise en forme des flans, ou un traitement chimique acide avant la frappe appelé blanchiment, peuvent intervenir (Arles *et al.*, 2005 ; Beck *et al.*, 2004 ; Cope, 1972).

Les expérimentations menées par Arles ont ainsi mis en évidence que le travail du métal destiné à produire des flans à partir de lames pouvait donner l'aspect de l'argent à des alliages qui ne contiennent que 30 % de ce métal (Arles *et al.*, 2005). Le travail mécanique destiné à enrichir la surface en argent est préconisé dans le papyrus de Leyde, traité d'alchimie antique (Halleux, 1981). Les recherches d'Arles ont également démontré que le travail de l'alliage conduit inévitablement à la formation d'oxydes de cuivre en surface qui sont éliminés par le travail de martelage et un bain acide (Arles *et al.*, 2005).

Les publications de Beck et d'Arles qui traitent de l'enrichissement de surface des alliages argent-cuivre se concentrent sur les migrations des différents éléments durant leur mise en forme (Arles *et al.*, 2005 ; Beck *et al.*, 2004). Beck a mesuré des couches comprises entre 20 et 80  $\mu\text{m}$  pour des compositions Ag-Cu 80-20 et 30-70 (Beck *et al.*, 2004). L'étude de coupes de recréations réalisées par Arles révèle une épaisseur maximale de 15  $\mu\text{m}$  pour des alliages binaires Ag-Cu 30-70, après quatre passes de déformation plastique et de recuit de recristallisation (Arles *et al.*, 2005). Ces deux études montrent que la ségrégation des différents éléments durant le refroidissement entraîne un enrichissement de surface avant le travail des monnaies ; puis l'épaisseur de cette couche est amoindrie durant les passes de martelage, et les oxydes de cuivre formés en surface sont éliminés.

Les compositions des couches superficielles enrichies en argent déterminées par SEM-EDX (Microscope électronique à balayage couplé à un détecteur de rayons X) sur des recréations simplement coulées sont celle de l'eutectique Ag-Cu si l'alliage de départ contient moins d'argent que cet eutectique, ou celle d'un alliage argent-cuivre contenant plus de 90 % d'argent si la teneur de cet élément de l'alliage de départ est supérieure à 72 % (Beck *et al.*, 2004).

Les alliages archéologiques issus des fouilles de l'atelier monétaire médiéval de La Rochelle, et dont la composition de départ est identique à celle des recréations d'Arles (soit 30 % d'argent et 70 % de cuivre), présentent des couches superficielles enrichies en argent d'une épaisseur de l'ordre de 300  $\mu\text{m}$  (Arles *et al.*, 2005). Les traitements mécaniques subis par ces objets ne sont pas connus, et peuvent donc différer de ceux pratiqués par Arles sur ses recréations. Des écarts importants sont observés entre les couches superficielles enrichies en argent mesurées sur des échantillons archéologiques et sur des recréations modernes. Cela laisse penser que l'enrichissement de surface qui apparaît durant la mise en forme ne constitue pas la contribution prépondérante à l'ensemble du phénomène observé



de nos jours sur des pièces anciennes. Cette opinion est partagée par des auteurs ayant étudié ces phénomènes spécifiquement (Condamin et Picon, 1964b).

Par la suite, durant la circulation des monnaies, mais sans doute encore davantage après leur enfouissement, interviennent d'autres phénomènes. La cause première de ces phénomènes provient des différences de caractéristiques électrochimiques de l'argent et du cuivre (Carter, 1964 ; Condamin et Picon, 1964a).

Le cuivre est en effet plus facilement oxydable que l'argent si l'on se réfère aux valeurs de leurs potentiels électrochimiques. On observe donc, durant la circulation des monnaies et après leur enfouissement, une oxydation préférentielle du cuivre à la surface des alliages en contact avec l'air ou le sol. Le cuivre oxydé occupe un volume plus important que le cuivre métallique (facteur 1,6) ; en conséquence, les oxydes de cuivre formés sont contraints d'être éliminés à la surface de la pièce (Condamin et Picon, 1964b ; Condamin et Picon, 1972).

Un autre phénomène se combine alors au précédent : l'existence d'un gradient de concentration en cuivre entre la surface et l'intérieur de la monnaie, présent dès la mise en circulation, et renforcé par la suite par le départ du cuivre oxydé, conduit à une lente migration des atomes de cuivre présents dans l'alliage sain vers l'extérieur. Ces atomes de cuivre sont à leur tour oxydés et se désolidarisent de la monnaie (Condamin et Picon, 1964a ; Condamin et Picon, 1964b ; Condamin et Picon, 1965 ; Condamin et Picon, 1972).

Les contributions à l'enrichissement de surface qui interviennent lors de la mise en forme des flans semblent être l'amorce des phénomènes ultérieurs. Ces derniers constituent la contribution la plus importante à la formation de la couche observée par l'analyste moderne (Condamin et Picon, 1964a ; Condamin et Picon, 1964b ; Condamin et Picon, 1972).

Néanmoins, le nombre de facteurs qui interviennent (proportions d'argent et de cuivre, géométrie de la monnaie, nombre de passes mécaniques et de recuits, blanchiment ou non, durée et conditions de circulation et d'enfouissement...) et la méconnaissance, au cas par cas, des données exactes pour chacun d'entre eux, impliquent une grande incertitude quant à l'estimation de l'importance de la couche d'enrichissement qui en résulte.

La compréhension des phénomènes mis en jeu qui ont conduit à la formation d'une couche superficielle enrichie en argent n'est pas l'objet de la présente thèse. Seule importe ici la prise en compte de cette couche dans le but d'une analyse fiable des monnaies d'argent. Nous remarquerons néanmoins que la

composition globale des pièces ne change que très peu durant les opérations de mise en forme des flans et de frappe des monnaies, tandis que le départ du cuivre oxydé durant la circulation et l'enfouissement affecte les teneurs moyennes des différents constituants de ces alliages monétaires (Condamin et Picon, 1964a). Ce ne sont donc pas les méthodes d'analyse de surface qui seront seules tributaires de ces changements, mais également les méthodes d'analyse globale appliquées aux monnaies anciennes à base d'argent (Guey, 1965).

Les travaux menés par Guey, Condamin et Picon sur cette thématique durant les années 1960 et 1970 illustrent clairement ce propos (Condamin et Picon, 1964a ; Condamin et Picon, 1964b ; Condamin et Picon, 1965 ; Condamin et Picon, 1972 ; Guey, 1962 ; Guey, 1965). Des écarts de l'ordre de 10 à 15 % absolus ont ainsi été observés entre analyse globale chimique et analyse de l'alliage sain sur coupe (Guey, 1965). De ce fait, toute tentative de caractérisation des monnaies d'argent se doit de tenir compte de l'existence de ces phénomènes ou, mieux encore, permettre d'en estimer l'importance dans le but d'optimiser la fiabilité des résultats.

Le phénomène de diffusion solide du cuivre n'affecte que de manière négligeable la composition de l'alliage situé au cœur de la monnaie (Condamin et Picon, 1964b). Cela signifie que cette partie de la pièce peut être considérée comme représentative de l'alliage monétaire tel qu'il a été frappé, et c'est donc cette partie qu'il convient de caractériser.

Les traitements appliqués aux monnaies suite à leur mise au jour, dans le but de les nettoyer ou de les restaurer, peuvent avoir une influence sur la composition de la proche surface. Les conséquences de ces nettoyages ont été peu étudiées de manière spécifique par le passé, et demeurent mal connues. Seules les expérimentations réalisées par Beck montrent que les traitements utilisés en restauration pour les monnaies d'argent renforcent l'enrichissement de surface résultant des phénomènes antérieurs (Beck *et al.*, 2008).

L'analyste qui cherche à caractériser les monnaies anciennes constituées d'un alliage à base d'argent se trouve ainsi confronté à un enrichissement de surface plus ou moins prononcé qui résulte de la conjonction de multiples facteurs. L'importance de chaque contribution est difficile à évaluer pour chaque monnaie. L'enrichissement de surface observé par l'analyste moderne semble toutefois être dû essentiellement à la conjonction de la corrosion et de la diffusion solide suite à l'enfouissement des pièces. Cela n'a néanmoins que peu d'importance ici puisque notre but n'est pas de connaître ce qui s'est passé entre la fabrication de la monnaie

et son analyse, mais de comprendre l'objet tel qu'il est entre nos mains pour optimiser sa caractérisation. Voyons maintenant ce que la bibliographie nous enseigne sur l'enrichissement de surface des monnaies anciennes en argent.

### **3. Etudes antérieures spécifiques à l'enrichissement de surface**

#### ***a. Observations générales***

Ce paragraphe ne traite pas des travaux antérieurs destinés à comprendre les mécanismes qui contribuent à l'enrichissement de la surface des monnaies en argent. Il s'agit ici de relever les publications dans lesquelles la structure actuelle de monnaies anciennes a été étudiée dans le but d'optimiser leur analyse, en tenant compte de l'enrichissement de surface.

Plusieurs publications, spécifiques ou non, ont traité par le passé de l'enrichissement de surface des monnaies d'argent. La plupart du temps, des coupes de monnaies ont été étudiées et les résultats obtenus sur ces coupes ont été comparés aux valeurs déterminées par des méthodes d'analyse de surface ou globale. Les conclusions des différents auteurs divergent : on peut ainsi lire qu'une analyse par spectrométrie de fluorescence X fournit des résultats fiables, sous réserve que les échantillons soient convenablement préparés (Carter, 1964) ; selon d'autres chercheurs, une caractérisation effectuée à l'aide d'une telle méthode ne peut être fiable si l'on souhaite rester dans une démarche non destructive (Linke *et al.*, 2004).

Certaines de ces publications sont partiellement reprises afin d'étudier la démarche des analystes, et les conclusions tirées des résultats obtenus.

Les recherches menées par Condamin et Picon sur l'enrichissement de surface des monnaies d'argent ont déjà été citées plusieurs fois dans cette thèse, en particulier relativement aux causes de ces phénomènes. Voyons maintenant ce que nous enseignent ces auteurs sur les implications de l'enrichissement de surface pour l'analyse de ce type d'échantillons.

Les études de Condamin et Picon ont mis en évidence un phénomène que l'analyste se doit de garder à l'esprit lorsqu'il s'agit de caractériser des monnaies d'argent : l'enrichissement de surface est nettement plus prononcé sur la tranche des pièces que sur leur face. Les deux schémas de coupes de monnaies présentés par ces auteurs à titre d'exemple, et reportés plus haut dans cette thèse (Figure 6 p. 29), illustrent clairement cette observation : on peut ainsi y déceler un phénomène de « recouvrement » entre les couches formées au départ sur la tranche et sur chacune des faces. Ce recouvrement donne naissance à un volume

périphérique enrichi en argent susceptible de représenter une proportion importante de l'ensemble de la monnaie (Condamin et Picon, 1964b ; Condamin et Picon, 1972). Le même phénomène peut être observé sur l'image obtenue par Linke sur une coupe de monnaie par microscopie électronique à balayage en mode électrons rétrodiffusés (Linke *et al.*, 2004).

Corrosion et diffusion suite à l'enfouissement sont, semble-t-il, à l'origine de ce recouvrement : l'épaisseur de l'enrichissement de surface observé sur des récréations de monnaies d'argent frappées est au contraire nettement moindre sur la tranche des alliages que sur leur face (Arles *et al.*, 2005). Cela suggère de surcroît que la principale contribution à l'enrichissement de surface total observé de nos jours sur une monnaie ancienne est postérieure à la frappe des monnaies.

Les épaisseurs des couches superficielles enrichies en argent mesurées par le passé sont comprises entre 50 et 300  $\mu\text{m}$ . On trouve par exemple des valeurs de 50 à 100  $\mu\text{m}$  (Linke *et al.*, 2004), 150 et 200  $\mu\text{m}$  (Tate, 1986), 200  $\mu\text{m}$  (Beck *et al.*, 2004) ou 300  $\mu\text{m}$  (Arles *et al.*, 2005).

Aucun lien ne semble exister entre l'état de surface des monnaies et l'altération véritable de l'alliage observée en coupe (Condamin et Picon, 1964a ; Condamin et Picon, 1972).

Les éventuels nettoyages pratiqués par les restaurateurs peuvent avoir modifié l'aspect de monnaies fortement corrodées, et leur avoir conféré l'aspect d'un excellent alliage quelle que soit la composition de départ. Ces observations mettent en évidence le caractère imprévisible de l'enrichissement de surface : aucun indice visuel, ou d'ordre numismatique, ne permet d'affirmer qu'une monnaie est affectée ou non par l'enrichissement de surface. Seule la destruction de l'objet pour en étudier la coupe permet d'estimer l'importance du phénomène.

Le caractère imprévisible de l'enrichissement de surface a été particulièrement mis en évidence par Linke : des monnaies d'un même trésor, de composition similaire, enfouies pendant la même durée et soumises aux mêmes variations de température et d'humidité, peuvent présenter des couches superficielles perturbées d'une épaisseur très variable, comprise entre 50 et 200  $\mu\text{m}$  (Linke *et al.*, 2003).

Les études sur des coupes de monnaies ne permettent pas de cerner véritablement les mécanismes qui ont abouti à la formation d'une couche de surface enrichie en argent. Leur compréhension pour leur prise en compte lors d'une analyse non destructive des monnaies est difficilement envisageable.

### ***b. Implications pour l'analyse des monnaies d'argent***

Les études de coupes de monnaies d'argent de Condamin et Picon ont démontré que l'enrichissement de surface affecte la composition globale de ces alliages. Et ici encore, les deux schémas repris des travaux de ces auteurs (Figure 6 p. 29) aident à la compréhension de cette problématique : l'enrichissement de surface visible sur ces coupes, sur leurs deux faces mais plus encore sur leurs tranches, représente une part non négligeable de l'ensemble de l'objet. Une analyse globale de monnaies qui présentent ce type d'enrichissement de surface fournira donc une composition moyenne qui tient compte à la fois de l'alliage sain et de la zone superficielle perturbée. Un risque de surestimation du titre d'argent de l'alliage sain existe donc en pratiquant une analyse globale (Condamin et Picon, 1964b ; Condamin et Picon, 1972 ; Guey, 1965).

Les chiffres présentés par Condamin et Picon sont particulièrement éloquents : le volume total d'alliage perturbé peut représenter jusqu'à la moitié de la monnaie complète. On comprend ainsi aisément qu'une analyse globale d'un tel échantillon peut conduire à une surestimation sensible de la teneur en argent de l'alliage sain. Ces chercheurs présentent à titre d'exemple des monnaies pour lesquelles le titre global est 10 à 13 % supérieur à celui de l'alliage sain (Condamin et Picon, 1964b). La fréquence de tels cas est difficile à estimer : la proportion du volume d'alliage perturbé par rapport au volume total de la monnaie dépend non seulement de ses caractéristiques intrinsèques (épaisseur et titre de départ principalement), mais également de la durée et des conditions subies durant l'enfouissement. Et si les cas comme ceux qui viennent d'être présentés sont sans doute rares dans nombre de *corpus*, les résultats de Condamin et Picon qui sont reportés ici nuancent le caractère de fiabilité absolue que l'on a longtemps prêté aux analyses globales de monnaies d'argent. Notre opinion à ce sujet ne peut être mieux synthétisée qu'elle ne l'a été par Guey et Condamin : « *Les essais passent pour apporter au numismate des données sûres et précises. C'est à bon droit – du moins dans la majorité des cas. Toutefois, même à l'égard des déterminations chimiques, une certaine défiance – une certaine vigilance critique – est de mise à présent* » (Guey et Condamin, 1961).

Les résultats obtenus par Linke abondent également dans ce sens (Linke *et al.*, 2004). Cet auteur présente l'image d'une coupe de monnaie obtenue par microscopie électronique à balayage. Cet échantillon, d'une épaisseur de l'ordre de 350 µm, présente une couche superficielle perturbée de l'ordre de 50 à 100 µm sur chaque face ; les teneurs moyennes en argent déterminées par SEM-EDX sont respectivement de 74,3 % pour l'alliage sain et de 95,8 % pour la couche perturbée. Un rapide calcul en fixant arbitrairement l'épaisseur de la couche enrichie en argent

à la valeur minimale mesurée, à savoir 50  $\mu\text{m}$ , donne un titre moyen sur l'ensemble de la monnaie de 80,1 % ; si la valeur de l'épaisseur de la couche enrichie en argent est fixée à 100  $\mu\text{m}$  sur chaque face, le titre moyen devient 86,5 %. Pour les deux calculs, l'enrichissement de surface présent sur la tranche de la monnaie, qui comme nous l'avons vu est particulièrement important pour les monnaies fines comme celle-ci, n'a pas été pris en compte, ce qui entraîne vraisemblablement une légère sous-estimation du titre global réel de chacun des cas étudiés. Les écarts observés sont toutefois respectivement de 6 % et 12 % absolus. On comprend ici qu'une couche de surface perturbée, même relativement peu épaisse, peut modifier de manière significative la composition globale d'une monnaie. Les pièces les plus fines, pour lesquelles la couche de surface enrichie en argent est susceptible de représenter une proportion importante du volume total de l'alliage, sont les plus sensibles à ce phénomène. L'analyse globale de monnaies d'argent peut ainsi surestimer de manière non négligeable le titre de certaines de ces pièces.

Ce sont cependant les méthodes d'analyse de surface qui sont les plus tributaires des variations de composition des monnaies d'argent. L'analyse de la seule proche surface conduit inévitablement à caractériser principalement ou exclusivement la couche superficielle perturbée, et donc à surestimer de manière plus ou moins importante le titre de l'alliage sain.

Condamine et Picon ont relevé des écarts absolus pour la teneur en argent compris entre 5 et 40 % entre analyse superficielle par spectrométrie de fluorescence X et analyse chimique (Condamine et Picon, 1964a). Les écarts reportés ici doivent être considérés comme des valeurs minimales entre teneur en argent de l'alliage sain et alliage de surface, l'analyse chimique globale étant elle aussi susceptible, nous l'avons vu, de surestimer le titre de l'alliage sain. Les écarts les plus importants observés concernent les alliages pour lesquels le titre global est compris entre 60 et 80 % d'argent (voir *infra* p. 161).

Les travaux du même type publiés par Linke ces dernières années illustrent également ce propos : des monnaies ont ainsi été analysées par spectrométrie de fluorescence X avant et pour certaines d'entre elles après une abrasion destinée à s'affranchir de l'enrichissement de surface, et par SEM-EDX sur des coupes polies (Linke et Schreiner, 2000 ; Linke *et al.*, 2004 ; Linke *et al.*, 2003). Les écarts entre les valeurs déterminées sur les coupes et à la surface des monnaies sans abrasion sont compris entre 3,2 % et 105,4 % relatifs (Linke *et al.*, 2003). Dans une autre étude de ce même chercheur, les résultats obtenus sur 25 monnaies, cette fois par SEM-EDX sur leur coupe et par spectrométrie de fluorescence X après nettoyage

de la tranche, révèlent un titre moyen d'argent mesuré de 44,0 % dans le premier cas et de 74,1 % dans le second (Linke *et al.*, 2004).

Des écarts du même ordre ont été reportés dans d'autres études présentant des résultats obtenus en suivant une méthodologie similaire (Hendy et Charles, 1970 ; Linke et Schreiner, 2000 ; Tate, 1986).

De telles différences démontrent que même après un nettoyage destiné à éliminer la couche superficielle perturbée, une surestimation importante ne peut être exclue. Dans tous les cas, seule la destruction de la monnaie permet véritablement de s'affranchir de l'enrichissement de surface et d'analyser avec certitude l'alliage sain en utilisant les méthodes développées jusqu'à maintenant.

### **III. Les méthodes d'analyse antérieures**

Les premières analyses élémentaires de monnaies d'argent remontent à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle (Klaproth, 1792). Elles se sont ensuite développées durant le XIX<sup>e</sup> siècle (Akerman, 1834 ; Brambilla, 1883 ; Hoefler, 1842 ; Papadopoli, 1893). A cette époque, la seule possibilité qui s'offrait aux numismates désireux de mieux connaître leurs objets d'étude à travers le titre de métal précieux était de pratiquer une analyse chimique destructive. Ce type d'analyse suppose la dissolution par un acide de l'échantillon que l'on souhaite caractériser, puis un dosage de l'argent contenu dans la solution pour en déterminer la concentration. Il s'agit donc d'une procédure destructive.

L'apport indiscutable de telles recherches, et l'absence d'alternative satisfaisante, justifiaient de sacrifier quelques exemplaires pour une compréhension globale des monnayages étudiés. Les analyses chimiques destructives ont ainsi constitué, pour les monnaies d'argent, la seule possibilité d'en déterminer la composition jusqu'à l'apparition des méthodes spectrométriques modernes.

Les premières analyses non destructives de pièces constituées d'un alliage à base d'argent remontent à la fin des années 1950 et au début des années 1960. Sont alors apparues à la fois des méthodes qui permettent une analyse de la surface des monnaies comme la spectrométrie de fluorescence X (Carter, 1964 ; Hall, 1960 ; Hall *et al.*, 1964), ou d'analyse globale, comme l'activation neutronique (Emeleus, 1958 ; Kraay, 1959 ; Sutherland et Harold, 1961 ; Thompson, 1960).

Deux autres méthodes d'analyse de surface sont apparues plus récemment : la première consiste à coupler un détecteur de rayons X en dispersion d'énergie à un microscope électronique à balayage (SEM-EDX). Le matériau à analyser est également bombardé par un faisceau d'électrons pour la seconde méthode ; mais dans ce cas, la détection des rayonnements X émis se fait en fonction de leur

longueur d'onde (microsonde de Castaing ou microsonde ; en anglais milliprobe, ou Electron Probe Micro-Analysis – EPMA).

Enfin, deux nouvelles méthodes d'analyse par activation appliquées aux monnaies d'argent sont apparues au début des années 1980 : la première, semi-globale, consiste en l'activation de l'alliage à l'aide de protons (Activation Protonique, ou Proton Activation Analysis – PAA), tandis que la seconde, globale, fait intervenir des neutrons rapides (Activation aux Neutrons Rapides de Cyclotron – ANRC, ou Fast Neutron Activation Analysis – FNAA).

Les principales caractéristiques de ces méthodes sont présentées dans les paragraphes qui suivent, des plus superficielles jusqu'aux méthodes globales. Nous verrons quelles en sont les principales caractéristiques, avantages et limitations. Les solutions proposées par certains analystes pour s'affranchir de l'enrichissement de surface sont également étudiées.

## **1. Les méthodes d'analyse de surface**

### ***a. La microscopie électronique à balayage couplé à un détecteur de rayons X en dispersion d'énergie et la microsonde de Castaing***

Ces deux méthodes diffèrent du point de vue de certaines caractéristiques liées principalement au mode de détection, mais également de certains paramètres expérimentaux. Les résultats fournis, ainsi que leur nature, sont toutefois suffisamment proches pour qu'elles puissent être traitées conjointement.

Dans les deux cas, c'est l'interaction entre un faisceau d'électrons microscopique et la surface de l'échantillon à analyser qui est à l'origine du phénomène mesuré. La principale différence entre les deux méthodes réside dans le mode de détection des rayons X émis par la matière soumise au faisceau d'électrons incident : dans le premier cas, la sélection se fait selon l'énergie de la transition électronique, tandis que c'est la longueur d'onde du rayonnement X émis qui est utilisée pour caractériser chacun des constituants dans le second.

La profondeur d'investigation de ces méthodes est de l'ordre de 5  $\mu\text{m}$  dans une matrice à base d'argent (Klockenkämper *et al.*, 1999). Cela est bien entendu insuffisant pour analyser des monnaies d'argent, même avec un enrichissement de surface d'une épaisseur relativement faible. De plus, les limites de détection de ces deux techniques sont inappropriées pour une caractérisation complète des monnaies d'argent. Elles sont en effet insuffisantes pour déterminer les teneurs de certains éléments mineurs et traces qui peuvent permettre de différencier des stocks de métal d'origine différente (Northover, 1998).



### ***b. Le PIXE***

La méthode PIXE (Particle Induced X-ray Emission, en français Emission X induite par des particules chargées) utilise un faisceau de particules chargées pour irradier l'échantillon. Il s'agit le plus souvent des protons d'une énergie de l'ordre de 2 à 3 MeV. La matière réagit à cette excitation en émettant des photons X caractéristiques de chaque élément suite au réarrangement du cortège électronique provoqué par la particule incidente.

Cette méthode permet théoriquement la détection de tous les éléments du sodium à l'uranium. Pour l'analyse des monnaies d'argent, cela signifie que l'ensemble des éléments susceptibles d'être intéressants, qu'ils soient majeurs, mineurs ou traces, peuvent être dosés.

Le principal avantage du PIXE en comparaison avec les méthodes d'interaction électronique est la détection des éléments-traces : selon Guerra, les limites de détection en PIXE sont de l'ordre de la ppm pour les éléments dont le Z est compris entre 15 et 45, et de 5 ppm pour les éléments de Z supérieur (Guerra et Barrandon, 1998). Pour d'autres auteurs, le cuivre, l'argent, le plomb et l'or peuvent être dosés quantitativement, tandis que le zinc, l'arsenic, le bismuth, l'étain et l'antimoine peuvent être détectés seulement qualitativement (Flament et Marchetti, 2004).

La profondeur d'investigation de cette méthode est légèrement supérieure à celle des deux méthodes électroniques présentées plus haut : l'analyse par PIXE des monnaies d'argent permet en effet de pénétrer ces alliages sur une profondeur de l'ordre de 5 à 30  $\mu\text{m}$  selon les auteurs et selon les éléments. Les valeurs énoncées sont le plus souvent comprises entre 5 et 10  $\mu\text{m}$  (Flament et Marchetti, 2004 ; Linke *et al.*, 2003 ; Smit et Kos, 1984 ; Smit et Semrov, 2006 ; Weber *et al.*, 2000). Cette profondeur d'investigation est insuffisante pour la caractérisation de pièces d'argent du fait de l'enrichissement de surface, à l'instar des méthodes électroniques présentées plus haut. Linke *et al.* ont ainsi mesuré des écarts supérieurs à 50 % absolus entre les titres d'argent déterminés sur des monnaies d'argent par PIXE sans préparation et par SEM-EDS sur des coupes de ces mêmes échantillons (Linke *et al.*, 2003).

La méthode PIXE est restée, malgré tout, encore utilisée ces dernières années. Ainsi, certains des analystes qui ont publié des résultats obtenus par PIXE, bien qu'ils aient conscience de l'existence des phénomènes d'enrichissement de surface pour l'argent et le cuivre, appliquent cette méthode à des monnaies d'argent pour le dosage des éléments mineurs et traces dans le cadre d'études de provenance (Flament et Marchetti, 2004 ; Smit et Semrov, 2006). Ces éléments n'ont pas fait l'objet d'études aussi exhaustives que l'argent et le cuivre, toutefois les

publications antérieures ayant traité du comportement des éléments mineurs principaux (comme Pb, Au, Zn ou Sn) en plus des éléments majeurs ont révélé que ceux-ci sont affectés par les phénomènes d'enrichissement de surface au même titre que l'argent et le cuivre. On peut en conséquence imaginer que les éléments-traces sont tributaires des évolutions de composition des alliages monétaires selon leur répartition entre les phases constituées majoritairement d'argent ou de cuivre. Selon Condamin et Picon : « *cela* [les variations de teneurs des éléments mineurs et traces entre surface et intérieur] *doit rendre assez prudentes les déductions faites à partir de l'analyse superficielle des traces quant à l'origine des métaux constituant le flan, surtout lorsque des techniques de surface sont utilisées.* » (Condamin et Picon, 1964a). De ce fait, les études de provenance basées sur des analyses par PIXE doivent être considérées avec circonspection au même titre que les études portant sur le titre des monnaies sans préparation spécifique des échantillons.

### ***c. La spectrométrie de fluorescence X***

La spectrométrie de fluorescence X est la méthode d'analyse non destructive la plus largement employée, par le passé mais encore actuellement, pour la caractérisation des monnaies anciennes à base d'argent. Les appareils qui permettent ce type d'analyse sont en effet répandus dans les laboratoires de différentes spécialités. La faiblesse de leur coût relativement aux appareillages utilisant un faisceau incident d'électrons pour caractériser la matière (SEM-EDX ou microsonde de Castaing), et *a fortiori* en comparaison avec les accélérateurs nécessaires aux méthodes neutroniques ou protoniques, facilite leur acquisition. La rapidité des analyses, l'absence – théorique – de préparation des échantillons, ainsi que l'existence d'appareillages portables, ont également contribué à la popularité de cette méthode.

En spectrométrie de fluorescence X, l'échantillon à analyser est soumis à un faisceau de rayons X ponctuel. La matière irradiée émet à son tour des rayons X, dont la détection permet de caractériser la composition de l'échantillon. Cette détection se fait le plus souvent en dispersion d'énergie, mais parfois en dispersion de longueur d'onde (Carter, 1998 ; Klockenkämper *et al.*, 1999). La profondeur analysée est identique dans les deux cas.

Une première limitation de la spectrométrie de fluorescence X concerne les limites de détection : celles-ci sont en effet de l'ordre de 300 à 500 ppm (Cowell, 1998), ce qui est insuffisant pour le traçage de certains éléments pour des études de provenance.

Des réserves concernant la pertinence des analyses par spectrométrie de fluorescence X sont apparues dès les premières applications de cette technique aux pièces d'argent (Carter, 1964 ; Hall, 1960). L'enrichissement en argent de la surface des monnaies a été rapidement mis en évidence et désigné comme une source d'erreur possible. Car si la profondeur d'investigation pour cette méthode est plus importante que celles qui caractérisent les méthodes utilisant un faisceau d'électrons ou de protons, elle n'est que de quelques dizaines de  $\mu\text{m}$  dans une matrice à base d'argent (30  $\mu\text{m}$  selon Klockenkämper ; (Klockenkämper *et al.*, 1999)). Cela n'est pas suffisant pour l'analyse de monnaies d'argent qui peuvent présenter des couches de surface dont la composition a été modifiée.

La profondeur caractérisée en spectrométrie de fluorescence X dépend de manière importante des paramètres expérimentaux. L'énergie des rayons incidents, caractéristique de la nature du tube employé, et la tension d'accélération, modifient la profondeur de pénétration des rayons X dans la matière. Des variations de ces conditions opératoires sont ainsi vraisemblablement à l'origine des différences observées entre les profondeurs analysées énoncées par les chercheurs cités dans le paragraphe suivant.

Les profondeurs d'investigation estimées par Tate dans un alliage composé à 77 % d'argent, 20 % de cuivre et 3 % d'or sont les suivantes : 15  $\mu\text{m}$  pour Cu ; 20  $\mu\text{m}$  pour Au ; 25  $\mu\text{m}$  pour Pb ; 130  $\mu\text{m}$  pour Ag ; 180  $\mu\text{m}$  pour Sn (Tate, 1986). Des valeurs comparables sont données pour l'argent et le cuivre par Linke et Schreiner (Linke et Schreiner, 2000). Pour Hendy et Charles, ces valeurs sont respectivement de 20  $\mu\text{m}$  et 60  $\mu\text{m}$  pour les raies  $K\gamma$  du cuivre et de l'argent dans un alliage binaire contenant 10 % de cuivre (Hendy et Charles, 1970).

L'examen de ces valeurs montre que la spectrométrie de fluorescence X ne permet pas, le plus souvent, de passer outre la couche d'enrichissement de surface pour l'argent. Dans les cas les plus favorables, c'est-à-dire quand cette couche est particulièrement mince, la surestimation du titre d'argent pourra être minime et donc acceptable. En revanche, la surestimation sera trop importante dans les autres cas pour que l'on puisse se satisfaire des résultats obtenus ainsi.

Les valeurs de profondeur analysée montrent de plus que ce n'est pas la même matière qui est caractérisée pour les différents éléments dosés. Cela est particulièrement visible pour le cuivre et l'argent : les profondeurs d'investigation respectives de ces deux éléments seraient de 130  $\mu\text{m}$  et de 15  $\mu\text{m}$  (Tate, 1986), ou de 100  $\mu\text{m}$  et 10  $\mu\text{m}$  (Linke *et al.*, 2004). Ces valeurs montrent que la teneur déterminée pour le cuivre sera quasi-systématiquement affectée par

l'enrichissement de surface, tandis que celle de l'argent sera plus ou moins surestimée. Dans tous les cas, le volume de matière qui réagit aux rayons X incidents ne sera pas le même pour ces deux éléments : la profondeur d'investigation varie entre eux d'un facteur supérieur à huit. Une analyse par spectrométrie de fluorescence X n'aura donc de sens que pour un matériau homogène en profondeur. Or les monnaies anciennes à base d'argent ne répondent pas à ce critère pour la plupart d'entre elles. L'utilisation de cette méthode sur des monnaies anciennes dont la couche superficielle perturbée excède fréquemment 100 µm d'épaisseur n'est donc pas satisfaisante, du moins sans préparation des échantillons.

L'analyse des monnaies d'argent par spectrométrie de fluorescence X suppose donc que l'on élimine la couche superficielle enrichie en argent afin d'analyser l'alliage sain homogène en profondeur.

La spectrométrie de fluorescence X n'est donc pas la méthode simple, rapide et qui permet une analyse complète et fiable des monnaies d'argent que l'on espérait il y a une cinquantaine d'années. Il ne s'agit pas ici de dénigrer l'ensemble des résultats publiés par le passé en utilisant cette méthode ; il ne s'agit pas non plus de montrer du doigt les analystes spécialisés dans l'application de cette technique aux monnaies d'argent, qui se sont efforcés d'améliorer les protocoles analytiques dans le but d'optimiser la fiabilité des résultats. Cette méthode largement accessible constitue une excellente première approche semi-quantitative des monnaies, par exemple pour un lot de pièces dont le type d'alliage est inconnu (Brissaud *et al.*, 1990).

En revanche, l'emploi de la spectrométrie de fluorescence X pour une analyse quantitative est hasardeux, et les procédures de nettoyage des pièces visant à s'affranchir de l'enrichissement de surface sont longues et contraignantes (Carter, 1964 ; Cowell, 1998).

## **2. Les méthodes d'analyse semi-globale et globale**

### ***a. L'activation protonique***

La première mention d'analyses de monnaies anciennes par activation protonique date de la fin des années 1960 (Meyers, 1969). L'approche proposée alors a été par la suite perfectionnée ; l'énergie des particules chargées incidentes, en particulier, a été revue. L'activation protonique a été appliquée avec succès à des problématiques de provenance liées à la présence de certains éléments-traces à partir des années 1970 (Barrandon *et al.*, 1973a ; Barrandon *et al.*, 1973b ; Guerra, 2004).

Cette méthode d'analyse élémentaire a été considérée comme semi-globale dans le cas des monnaies d'argent, à mi-chemin entre les méthodes d'analyse de surface présentées plus haut et les méthodes d'analyse globale pour lesquelles aucune préparation de l'échantillon n'est préconisée.

L'analyse par activation protonique consiste en l'irradiation de l'échantillon par un faisceau de protons d'une énergie de l'ordre de 12 MeV ; les émissions  $\gamma$  caractéristiques des radio-isotopes générés sont mesurées après l'irradiation. Trente éléments environ peuvent être dosés par activation protonique dans les monnaies d'argent. Les limites de détection sont très basses, de 10 à 500 ppb pour As, Sb, Zn, Sn, Pt, Hg, Au, Ni, Pd, Cu et Pb (Barrandon, 1978).

La profondeur d'investigation de l'activation protonique dans les alliages d'argent serait de l'ordre de 300  $\mu\text{m}$  d'après certaines publications (Barrandon, 1980 ; Guerra et Barrandon, 1998). Cependant, la principale étude consacrée à l'analyse des monnaies d'argent par cette méthode indique : « *l'épaisseur effectivement analysée par les protons de 11,36 MeV est de l'ordre de 200 microns alors que le parcours total de ces particules dans une monnaie en alliage argent-cuivre est aux environs de 300 microns* » (Basutçu, 1980). Les particules pénètrent donc une couche de surface de 300  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, cependant l'atténuation de la pénétration des particules incidentes est telle que seuls les 200 premiers microns sont réellement caractérisés.

Une épaisseur d'investigation efficace de 200  $\mu\text{m}$  est insuffisante pour que la surestimation du titre d'argent ne soit pas négligeable pour de nombreuses monnaies. Les cas où l'erreur est acceptable sont certes plus nombreux que pour les méthodes plus superficielles présentées plus haut. Néanmoins, l'analyse des pièces d'argent par activation protonique ne peut permettre une caractérisation quantitative juste le plus souvent. Ainsi, les valeurs de titre d'argent obtenues en utilisant cette méthode sont fiables pour les monnaies qui présentent une couche d'enrichissement de surface relativement peu épaisse, et pour lesquelles l'écart entre la teneur en argent de l'alliage sain et de la proche surface est minime. En pratique, la surestimation du titre d'argent de l'alliage qui n'a pas été affecté par les phénomènes d'enrichissement de surface sera négligeable en utilisant cette méthode si la couche superficielle perturbée n'excède pas 100  $\mu\text{m}$ , et si l'écart entre les deux teneurs en argent est inférieur à 10 % absolu.

Les diagrammes présentés dans la thèse de Basutçu mettent clairement en évidence la surestimation du titre d'argent des monnaies par activation protonique :

les écarts absolus entre les valeurs déterminées à l'aide de protons ou de neutrons varient entre 5 % et 45 % selon les cas ; des différences particulièrement marquées apparaissent pour les alliages contenant 30 à 60 % d'argent (Basutçu, 1980).

L'analyse par activation protonique de monnaies d'argent n'est donc pas satisfaisante. Les cas pour lesquels l'enrichissement de surface est prépondérant dans le volume de matière analysé par cette méthode ne peuvent être distingués de ceux pour lesquels l'analyse est juste. L'activation protonique ne peut s'appliquer qu'à des monnaies d'argent d'excellent titre pour lesquelles l'enrichissement de surface ne peut être significatif.

### ***b. L'activation neutronique***

L'analyse des monnaies d'argent par activation neutronique se décompose comme l'activation protonique en deux étapes distinctes.

Dans un premier temps, l'échantillon à analyser est irradié par un flux de neutrons. Des radio-isotopes sont créés au sein de la matière constituant l'objet analysé ; ces radio-isotopes émettent des rayonnements  $\gamma$  dont l'énergie est caractéristique.

Dans un deuxième temps, une mesure de spectrométrie  $\gamma$  est effectuée. Le signal mesuré pour chaque valeur d'énergie correspondant à la désintégration d'un radio-isotope d'un des éléments que l'on souhaite doser permet de déterminer la concentration de chacun des éléments détectés.

L'analyse par activation neutronique des monnaies d'argent a tout d'abord été effectuée à l'aide de neutrons thermiques. Par la suite, des neutrons rapides ont été utilisés pour l'irradiation des échantillons.

#### *i - L'activation à l'aide de neutrons thermiques*

Les analyses de monnaies d'argent par activation à l'aide de neutrons thermiques sont apparues à la fin des années 1950. Les deux premières publications qui présentent des résultats obtenus pour de tels échantillons concernent de monnayages grecs (Emeleus, 1958 ; Kraay, 1959).

L'analyse de monnaies d'argent par activation à l'aide de neutrons thermiques s'est ensuite répandue, et nombre de publications sont dédiées spécifiquement à l'interprétation de résultats obtenus sur différents monnayages en suivant cette approche (Gordus, 1967 ; Schweizer et Friedman, 1972).

Selon Barrandon, l'analyse des monnaies d'argent à l'aide de neutrons thermiques n'est pas satisfaisante du fait de la radioactivité résiduelle non négligeable des échantillons, et de la faible sensibilité qui caractérise cette méthode (Barrandon, 1980 ; Barrandon, 1984). La radioactivité résiduelle a été jugée telle que les pièces ne peuvent être rendues au musée ou au collectionneur après irradiation (Gilmore, 1998).

Barrandon a proposé par la suite d'utiliser une source de  $^{252}\text{Cf}$  pour irradier les échantillons en préalable à la mesure de spectrométrie  $\gamma$  (Barrandon, 1980 ; Barrandon *et al.*, 1977). La gamme d'énergie de ces neutrons les classe dans la catégorie des neutrons thermiques. Toutefois, cette approche ne permet que le seul dosage des éléments majeurs.

Ce même chercheur a, par la suite, proposé de réaliser l'analyse des monnaies d'argent à la fois par activations neutronique et protonique : la première méthode fournit les teneurs en éléments majeurs, tandis que la seconde permet le dosage des éléments mineurs et traces (Barrandon, 1980). Cette approche peut néanmoins sembler risquée : les principes de ces deux méthodes supposent que la matière caractérisée, pour la première sur l'ensemble de l'échantillon, et sur une couche superficielle de 200  $\mu\text{m}$  pour la seconde, sont représentatives de l'alliage sain. Or, l'enrichissement de la surface des monnaies en argent, et les variations de teneur entre surface et intérieur des éléments mineurs principaux, sont une source d'erreur plus ou moins importante dans les deux cas.

Une première limitation de l'activation neutronique des monnaies d'argent trouve son origine dans les phénomènes d'auto-absorption (Gilmore, 1998). Des corrections peuvent néanmoins être apportées pour s'affranchir de ces différences d'absorption. De plus, l'analyse par activation à l'aide de neutrons thermiques ne permet pas la détermination de deux éléments mineurs qui peuvent être relativement abondants dans les alliages monétaires à base d'argent : le plomb et le bismuth (Gilmore, 1998). Le dosage du bismuth est particulièrement important car cet élément peut s'avérer utile pour des études de provenance des métaux précieux.

Pour pallier les problèmes de radioactivité importante et d'auto-absorption, certains chercheurs ont émis l'idée de n'activer qu'une infime fraction de l'alliage. La solution d'un micro-prélèvement effectué sur la tranche de la monnaie, d'une masse inférieure à 0,1 mg (« coin-streak »), a ainsi été proposée (Gordus, 1972). Cette approche permet un dosage systématique de Ag, Cu et Au, ainsi que d'As, Sb et Zn si la teneur de ces éléments est suffisante. Gilmore suggère quant à lui d'effectuer un micro-forage de 0,5 mm de diamètre sur la tranche (soit une masse de 15 mg) afin de n'irradier que cette infime fraction de la monnaie.

Ces deux approches sont toutefois limitées par l'épaisseur des monnaies. Un micro-forage n'est pas envisageable pour des pièces dont l'épaisseur est inférieure à 1 mm. Le phénomène de recouvrement de l'enrichissement de surface sur la tranche des monnaies mis en évidence par Condamin et Picon est également problématique pour l'analyse de micro-forages : le prélèvement effectué sur la tranche risque de n'être composé que partiellement d'alliage sain. Le reste du micro-forage constitué par l'alliage enrichi en argent sera également pris en compte et entraînera une surestimation du titre.

De plus, les analyses par activation neutronique effectuées sur des prélèvements de matière nécessitent une extraction chimique des éléments mineurs et traces pour permettre leur dosage (Meyers *et al.*, 1973 ; Meyers *et al.*, 1974). Ce processus long et contraignant rallonge la durée de l'analyse et amenuise encore davantage l'attrait initial des analyses neutroniques sur prélèvement.

#### *ii - L'Activation aux Neutrons Rapides de Cyclotron (ANRC)<sup>1</sup>*

La première suggestion de l'utilisation de neutrons rapides pour l'analyse de monnaies anciennes est à porter au crédit de Meyers (Meyers, 1969). Cependant, l'énergie des neutrons incidents proposée par cet auteur (26 MeV) était inappropriée car elle ne permettait pas le dosage des éléments-traces (Guerra et Barrandon, 1998).

C'est au cours des années 1980 que s'est développée l'Activation aux Neutrons Rapides de Cyclotron ou ANRC (Beauchesne et Barrandon, 1986). Cette technique a alors été appliquée essentiellement à des monnayages de bronze (Brenot et Barrandon, 1988), mais également à des monnaies d'argent (Barrandon *et al.*, 1988 ; Guerra *et al.*, 1989).

Les neutrons rapides utilisés pour ce type d'analyse sont plus énergétiques que les neutrons thermiques (au moins 2 MeV, contre quelques centaines d'eV). Ces neutrons rapides sont créés par l'irradiation d'une cible en béryllium par des deutons d'une énergie de 17,5 MeV ; par réaction (d,n) sur le béryllium, un flux de neutrons dits rapides d'une énergie de l'ordre de 6 à 8 MeV est alors émis. Ces neutrons traversent ensuite l'échantillon à analyser, qui émet à son tour de la radioactivité. Des mesures successives de spectrométrie gamma sont ensuite effectuées afin d'obtenir une caractérisation globale de l'échantillon irradié.

L'activation des monnaies à l'aide de neutrons, qu'ils soient rapides ou thermiques, permet une analyse globale, fiable dans la plupart des cas. La

---

<sup>1</sup> Le principe détaillé de l'analyse des monnaies d'argent par Activation aux Neutrons Rapides de Cyclotron apparaît en Annexe 1.



proportion de métal dont la composition n'est pas représentative de celle de l'alliage tel qu'il a été frappé doit cependant être négligeable par rapport à l'ensemble de l'échantillon. L'enrichissement de surface peut entraîner une incertitude pour certains échantillons, en particulier les monnaies très fines (Condamin et Picon, 1964a ; Condamin et Picon, 1964b ; Condamin et Picon, 1972 ; Guey, 1965).

Les limites de détection en ANRC dépendent des conditions dans lesquelles sont effectuées les mesures de spectrométrie  $\gamma$ . Les émissions de certains radioisotopes ne peuvent s'effectuer qu'après la décroissance du signal d'autres radioisotopes dont le rayonnement est d'énergie identique. Cela signifie que plusieurs mesures de spectrométrie  $\gamma$  doivent être effectuées si l'on souhaite caractériser tous les constituants des monnaies : des premières mesures relativement courtes, peu de temps après l'irradiation, tout d'abord ; puis une ou plusieurs mesures plus longues afin de détecter les éléments moins concentrés.

Une limitation importante inhérente à l'ensemble des méthodes d'activation des échantillons à l'aide de neutrons est la nécessité d'une source pour produire ces particules. Qu'il s'agisse d'un réacteur nucléaire ou d'une source isotopique, cela constitue une contrainte importante pour réaliser ce type d'analyse. En outre, la gestion d'objets radioactifs n'est pas sans poser de problèmes au quotidien eu égard à une législation de plus en plus contraignante.

#### **IV. Solutions proposées antérieurement pour s'affranchir de l'enrichissement de la surface en argent**

Les variations de composition qui existent entre surface et intérieur sont une source d'erreur pour l'analyse des monnaies d'argent. Des stratégies ont été développées par certains analystes, en particulier ceux utilisant des méthodes d'analyse superficielle, afin de retirer la couche de surface dont la composition a été modifiée. Divers traitements, mécaniques et/ou chimiques ont ainsi été proposés.

Le plus souvent, les traitements mécaniques préconisés consistent en un polissage d'une petite surface de l'échantillon (Northover, 1998) ou un micro-sablage (Carter, 1964 ; Carter, 1973). Les traitements chimiques, proposés seuls ou consécutivement à un traitement mécanique du type de ceux qui viennent d'être présentés, sont le plus souvent un bain acide (Carter, 1964 ; Hendy et Charles, 1970) ou un solvant organique (Civici *et al.*, 2007 ; Linke *et al.*, 2004 ; Linke *et al.*, 2003).

Ces traitements destinés à révéler l'alliage sain présent sous la couche perturbée doivent, selon la plupart des auteurs, être répétés autant de fois que nécessaire, c'est-à-dire jusqu'à la stabilisation des teneurs des différents éléments mesurés (Carter, 1973 ; Carter, 1998 ; Metcalf et Schweizer, 1971 ; Schweizer, 1972). Selon Cowell, 100  $\mu\text{m}$  au moins doivent être retirés afin de s'affranchir de la surface enrichie en argent (Cowell, 1998).

Schweizer suggère de travailler sur la face des monnaies si celles-ci sont trop fines pour permettre une analyse sur une zone nettoyée de la tranche (Schweizer, 1972). La taille de la zone à traiter doit être de l'ordre d' $1\text{ mm}^2$  selon cet auteur pour obtenir des résultats fiables. Une telle surface est trop importante pour être invisible à l'œil nu. Le nettoyage sera particulièrement visible pour les monnaies dont la surface est corrodée et de couleur noire, et pour lesquelles apparaîtra une zone de métal brillant après le nettoyage nécessaire à l'analyse de surface.

Cowell propose de réaliser l'abrasion sur la tranche des monnaies (Cowell, 1998). Une telle procédure n'est toutefois pas convenable pour les pièces qui présentent un enrichissement de surface conséquent. En effet, les schémas de coupes publiés par Condamin et Picon révèlent que l'épaisseur de la couche perturbée est nettement plus importante sur la tranche des monnaies que sur leur face (Condamin et Picon, 1964b ; Condamin et Picon, 1972). Les résultats présentés par ces auteurs constituent les cas les plus délicats à aborder, quelle que soit la méthode employée. L'analyse de l'alliage sain par une méthode de surface comme la spectrométrie de fluorescence X suite à une abrasion ne peut se faire sans causer de dommages visibles à l'échantillon, qu'elle soit pratiquée sur la tranche ou sur la face. Dans de nombreux cas, le polissage de la tranche pour atteindre l'alliage sain est incompatible avec l'impératif de non destructivité imposé par la valeur historique des monnaies anciennes en argent.

Selon Carter, qui propose un traitement de la surface par micro-sablage pour atteindre l'alliage sain, une à deux heures sont nécessaires à l'analyse d'une monnaie. Le nettoyage et diverses mesures requièrent une heure supplémentaire, soit une durée totale de deux à trois heures par échantillon (Carter, 1964).

Deux cas peuvent être distingués : soit l'enrichissement de surface est important, et les traitements chimiques et mécaniques requis ne peuvent raisonnablement être envisagés de manière non destructive ; soit la couche de surface perturbée est suffisamment peu importante pour permettre de réaliser les traitements décrits plus haut sans causer de dommages visibles. Mais les procédures de nettoyage sont longues, et l'un des principaux atouts d'une méthode

comme la spectrométrie de fluorescence X qu'est la rapidité des analyses est compensé par ces traitements longs et fastidieux.

Le compromis entre non destructivité, prise en compte de l'enrichissement de surface et minimisation des contraintes pratiques semble ainsi difficile à trouver avec une méthode d'analyse de surface. Les procédures exposées ne proposent l'analyse de l'alliage qu'en une unique zone nettoyée, ce qui ne permet pas d'estimer l'homogénéité de l'ensemble de l'alliage. La fiabilité des résultats obtenus est ainsi encore davantage mise à mal. Selon Cowell, « *the limitations presented by the fact that XRF is a surface analysis technique, mean that true reliable non-destructive analysis is rarely achievable. There has to be some compromise between the required accuracy and the permitted damage to the artefact* » (Cowell, 1998).

Les méthodes d'analyses de surface, même précédées d'un traitement de surface, ne constituent donc pas une solution fiable pour la caractérisation des monnaies d'argent.

## **V. Implications pour l'analyse des monnaies d'argent**

La présentation des caractéristiques de composition et de structure des monnaies d'argent, ainsi que celle des méthodes d'analyse employées jusqu'à maintenant, nous permettent de dresser une liste des caractéristiques requises pour la caractérisation de ces objets :

- *non destructivité* : la méthode employée doit respecter l'intégrité de ces objets historiques précieux. Dans le cas de l'analyse de micro-prélèvements, les dommages causés aux monnaies doivent être invisibles à l'œil nu.

- *caractérisation complète des alliages monétaires* : il est impératif que la méthode employée permette le dosage de l'ensemble des constituants des monnaies : éléments majeurs, mineurs et traces. Cela implique que cette méthode soit caractérisée par des limites de détection basses, de l'ordre de la ppm. L'interprétation historique des résultats analytiques doit pouvoir s'appuyer sur les valeurs de titres d'argent des monnaies ; des évolutions temporelles ainsi que d'éventuelles disparités géographiques pourront être étudiées. Les teneurs des éléments mineurs et traces dosés pourront en outre être étudiées dans le but de différencier des stocks de métaux précieux, voire dans les cas les plus favorables de permettre d'en préciser l'origine.

- *prise en compte de l'enrichissement de surface* : l'existence d'une couche superficielle perturbée est fréquente sur les monnaies d'argent. Cette couche enrichie en argent est une source potentielle d'erreur pour les méthodes de

caractérisation employées jusqu'à maintenant, qu'elles soient globales ou de surface. Une analyse des monnaies d'argent doit permettre de s'affranchir de cette couche perturbée, sans toutefois causer de dommages visibles.

- *peu de contraintes pratiques* : les analyses doivent idéalement être rapides et relativement peu coûteuses. Un grand nombre de monnaies pourra ainsi être analysé, et l'interprétation portera sur un nombre d'échantillons représentatif. Cela signifie par exemple que les méthodes qui n'impliquent aucune phase de préparation des pièces doivent être privilégiées. Celles qui nécessitent une irradiation des échantillons ne doivent être employées qu'en dernier recours : il est préférable d'éviter de rendre radioactives des monnaies qui devront être stockées avant d'être rendues à leur propriétaire du fait de l'existence d'une législation contraignante sur la radioprotection.

## **B. La mise au point du protocole d'analyse des monnaies d'argent par LA-ICP-MS**

### **I. La méthode LA-ICP-MS**

La spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif avec prélèvement par ablation laser (LA-ICP-MS) est une méthode d'analyse multi-élémentaire qui permet de déterminer la composition d'une large gamme de matériaux solides.

C'est au milieu des années 1980 qu'apparaît le couplage d'un ICP-MS avec un système d'introduction par ablation laser (Arrowsmith, 1987 ; Gray, 1985). Cette innovation permet une analyse plus aisée des matériaux solides : aucune préparation ou mise en solution de l'échantillon n'est requise. L'ablation laser permet, selon la taille du faisceau utilisé, d'analyser une zone précise d'un matériau hétérogène, ou au contraire de caractériser l'ensemble du matériau si le volume du prélèvement permet d'obtenir des données représentatives. L'excellente source d'ionisation que constitue la torche à plasma permet la caractérisation d'un grand nombre d'éléments avec des limites de détection très faibles du fait de sa grande sensibilité.

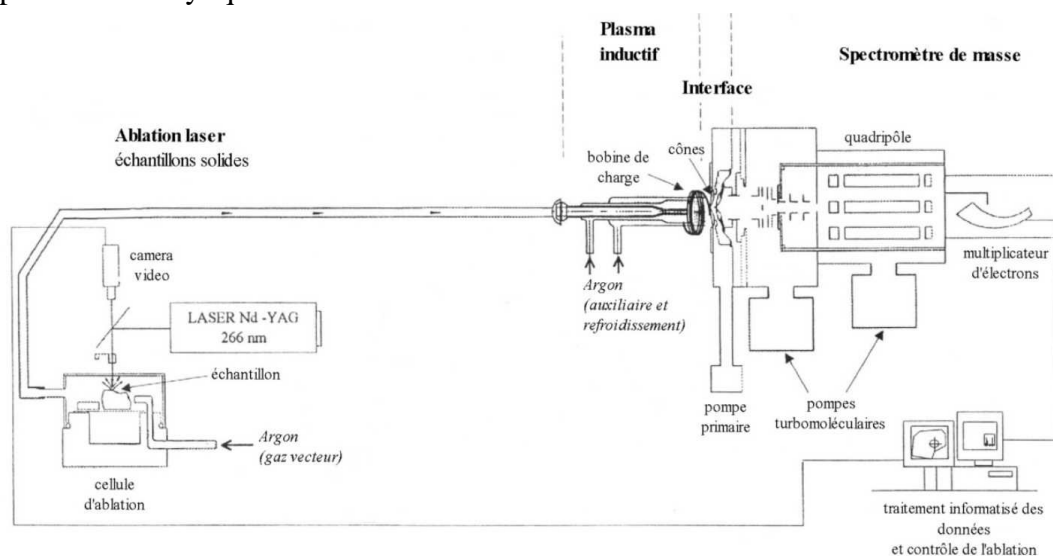
Très rapidement, la méthode LA-ICP-MS s'impose comme un des outils les plus performants pour l'analyse élémentaire des matériaux. Les applications se sont multipliées, en particulier durant les années 1990, principalement en géologie (Jackson, 2000 ; Jeffries *et al.*, 1995 ; Pearce *et al.*, 1992 ; Perkins *et al.*, 1993 ; Sylvester, 2003).

Certaines limitations, plus ou moins contraignantes selon le type de matériau et selon la précision recherchée, peuvent néanmoins apparaître. Sont cités

le plus souvent la nécessité de disposer de matériaux de référence fiables pour le calcul des concentrations, le fractionnement isotopique, et la faible taille du cratère d'ablation pour les matrices hétérogènes (Günther et Hattendorf, 2005 ; Günther *et al.*, 2000).

## 1. Principe de la méthode LA-ICP-MS

Le principe général de l'ICP-MS couplé à un dispositif d'ablation laser est présenté sur la Figure 7. Les paragraphes suivants détaillent chaque étape du processus analytique.



**Figure 7** - Schéma de principe d'un ICP-MS couplé à un dispositif d'ablation laser.

### a. L'ablation laser

Le but de l'ablation laser est de vaporiser une fraction microscopique de l'échantillon solide à analyser, à l'aide d'un laser de haute énergie. L'interaction explosive entre le laser et la matière est un phénomène complexe. Elle dépend de nombreux paramètres concernant aussi bien le laser, la nature de l'échantillon que le gaz vecteur. L'ablation laser conduit à la vaporisation de la matière, à l'éjection d'atomes, d'ions, d'espèces moléculaires et de fragments de matière, à la création d'ondes de choc, et à la formation et l'expansion d'un plasma.

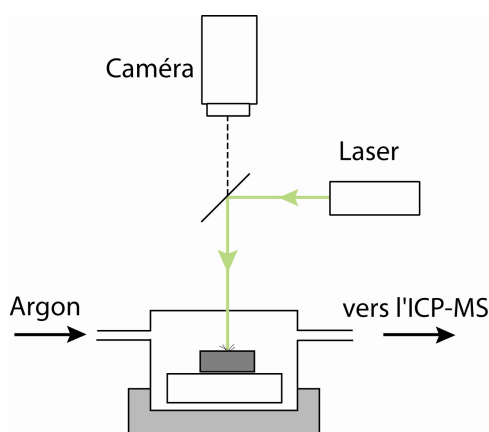
Le laser utilisé au Centre Ernest Babelon est du Type Nd:YAG (grenat d'yttrium et d'aluminium dopé par des ions  $Nd^{3+}$ ). Ce laser émet dans l'infrarouge à la longueur d'onde 1064 nm. Sa fréquence est quadruplée en intercalant des cristaux non linéaires sur le trajet optique du faisceau, réduisant ainsi sa longueur d'onde à 266 nm dans l'ultraviolet. Le faisceau laser est atténué puis collimaté à l'aide d'un des trois disques en céramique percés d'orifices dont les diamètres respectifs sont de 0,5, 1 et 2 mm, puis dévié vers l'échantillon à l'aide d'un miroir

incliné à 45°. Un système optique permet de visualiser avec précision la zone où sera effectué le prélèvement.

Pour l'analyse des matériaux anciens en général et des monnaies d'argent en particulier, l'émission du laser se fait en mode déclenché : dans cette configuration, le pompage optique est effectué au-delà du seuil de fonctionnement sans émission laser, puis l'émission est autorisée. Une impulsion très courte, de l'ordre de 5 ns dans notre cas, et très intense, est alors produite. Sa fréquence maximale est de 10 Hz ; l'énergie maximale est 2 mJ.

### ***b. La cellule d'ablation***

L'ICP-MS avec ablation laser utilisé au Centre Ernest Babelon est équipé de quatre cellules d'ablation différentes dont les dimensions varient entre 5,5 et 12 cm pour le diamètre et entre 2,5 et 4 cm pour la hauteur. Le flux d'argon balaie l'intérieur de la cellule et entraîne les particules prélevées vers la torche à plasma. La cellule est montée sur une table x, y, z dont le pas de déplacement est de 2,5  $\mu\text{m}$ . Le dispositif utilisé est présenté de manière schématique sur la Figure 8.



**Figure 8** - Schéma du dispositif d'ablation laser.

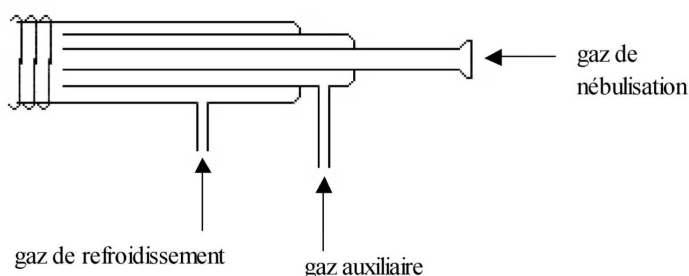
### ***c. L'ionisation du micro-prélèvement***

La spectrométrie de masse s'applique aux particules chargées ; l'ionisation de la matière prélevée est donc nécessaire en amont de la détection. C'est la torche à plasma qui assume ce rôle d'ionisation.

Le plasma est défini comme un quatrième état de la matière, constitué d'un gaz ionisé globalement neutre. Le plasma à couplage inductif est créé par le couplage de l'énergie d'un générateur de radiofréquence *Henry* à 27,12 MHz avec un gaz rare (de l'argon dans notre cas). La formation du plasma est consécutive à la mise en route d'un générateur auxiliaire qui crée, par décharge électrique, des

électrons au sein du gaz. Ces électrons sont ensuite accélérés par le champ électromagnétique créé par la bobine de charge. La collision de ces électrons avec des atomes de gaz neutres provoque l'ionisation de ces atomes et une nouvelle libération d'électrons.

L'énergie d'ionisation de l'argon est suffisamment élevée (15,76 eV) pour que son plasma constitue une excellente source d'ionisation. Plus de 50 éléments sont ionisés une fois avec un rendement supérieur à 90 %. H, C, N, O, S, Hg et les halogènes, de par leur énergie de première ionisation élevée, auront un rendement inférieur. Les éléments dont l'énergie de seconde ionisation est nettement inférieure à 15,76 eV et dont les rendements  $M^{2+}/(M+M^++M^{2+})$  sont non négligeables, sont susceptibles de créer des interférences.



**Figure 9** - Schéma de la torche à plasma.

La torche à plasma est positionnée horizontalement au centre d'une bobine formée de trois spires en cuivre refroidies par une circulation d'eau (Figure 9). Elle est constituée de trois tubes concentriques en quartz :

- un tube extérieur qui isole électriquement le plasma des spires de la bobine. Le gaz qui circule dans ce tube (gaz de refroidissement) avec un débit de  $14 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  isole les parois de la torche du plasma dont la température est de l'ordre de 5000 à 8000 K.

- un tube intermédiaire qui guide le gaz plasmagène ou auxiliaire mais ne pénètre pas à l'intérieur de l'inducteur.

- un tube intérieur par lequel est injecté le gaz de nébulisation qui véhicule l'échantillon. Ce courant d'argon perce le plasma, formant un tunnel central de quelques millimètres de diamètre où se produisent l'atomisation et l'ionisation de la matière prélevée sur l'échantillon.

#### ***d. Le transfert de l'échantillon vers le spectromètre de masse***

Le spectromètre de masse fonctionne à température ambiante et sous vide poussé (pression inférieure à  $10^{-3}$  Pa), tandis que le plasma a une température de 5000 à 8000 K, et sa pression est égale à la pression atmosphérique. En

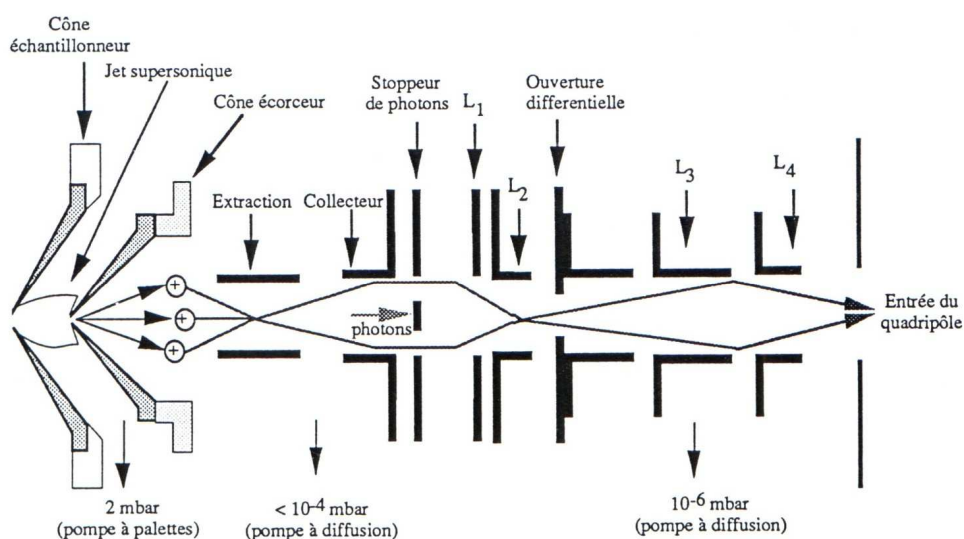
conséquence, une zone d'interface entre la torche à plasma et le spectromètre de masse est nécessaire afin de :

- passer de la pression atmosphérique à une pression réduite
- résister à des températures élevées
- transférer un échantillon représentatif du prélèvement ionisé par le plasma vers le spectromètre de masse.

Deux cônes en nickel (matériau choisi du fait de sa faible réactivité chimique et de ses qualités thermiques) délimitent l'interface. Ils sont appelés échantillonneur et écorceur, et percés respectivement d'un orifice de 0,9 mm et de 0,7 mm. Ils sont séparés d'une distance comprise entre 6 et 8 mm et refroidis par circulation d'eau. Entre ces deux cônes règne un vide primaire d'environ 200 Pa obtenu grâce à une pompe à palettes. Une seconde pompe peut être adjointe à la pompe à palettes afin d'augmenter le nombre d'ions extraits en diminuant la pression entre les deux cônes (« Option S »).

On obtient de la sorte un jet supersonique à l'arrière du cône échantillonneur, provoquant par expansion le refroidissement du gaz. Le cône écorceur prélève le centre du jet supersonique à la sortie de l'interface.

Après la traversée de l'interface, le faisceau d'ions diverge et doit donc être focalisé afin de le rendre concentrique à l'axe de l'analyseur de masse. Ce rôle est dévolu à l'optique ionique qui comprend six lentilles électrostatiques. Le stoppeur de photons élimine les photons émis par le rayonnement du plasma qui sont susceptibles d'augmenter le bruit de fond (Figure 10).

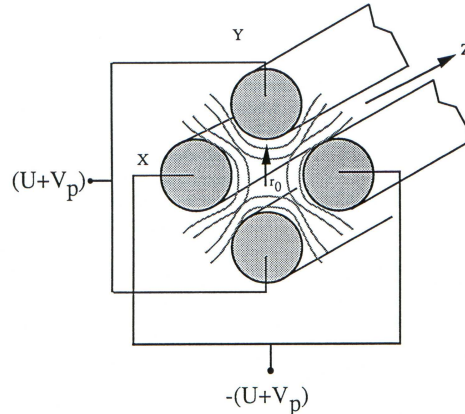


**Figure 10** - Interface et optique ionique.



**e. Le tri des ions**

Un filtre de masse quadripolaire sépare les ions en fonction de leur rapport masse sur charge. Il est constitué de quatre barreaux en molybdène de 12 mm de diamètre chacun et de 230 mm de longueur avec un pré-filtre de 16 mm. Les barreaux sont groupés deux par deux et portés à des tensions en opposition de phase (Figure 11).



**Figure 11** - Schéma du quadripôle.

Les tensions sont de la forme :

$$V_0 = U + V \cos(\omega t) \text{ avec}$$

U : tension produite par un générateur continu

V : tension alternative de fréquence f, produite par un générateur radiofréquence

L'arrangement des barreaux crée un cercle interne de rayon  $r_0$ . Les paramètres  $r_0$  et f étant fixes, seules les tensions U et V peuvent varier.

La trajectoire des ions dans le quadripôle est décrite par l'équation de Mathieu :

$$\frac{d^2 U}{d^2 E} + (a - 2q \cos 2E) = 0$$

$$a = a_x = -a_y = \frac{4eU}{m \omega^2 r_0^2}$$

$$q = q_x = q_y = \frac{2eV}{m \omega^2 r_0^2}$$

$$E = \frac{\omega t}{2}$$

V - amplitude de la tension alternative de fréquence f

U - amplitude de la tension continue

$r_0$  - rayon formé par l'arrangement des barreaux

m - masse de l'ion

e - charge électronique

$\omega$  - fréquence angulaire de la tension alternative

t - temps

La résolution de ces équations conduit à deux types de solution :

- une solution stable, représentant les trajectoires des ions qui passent le long du quadripôle à l'intérieur du cercle de rayon  $r_0$  et n'atteignent jamais la surface des barreaux.

- une solution instable, représentant les trajectoires des ions qui atteignent les surfaces des barreaux et sont donc arrêtés (ou filtrés) par l'analyseur de masse.

Ceci peut être mis en évidence graphiquement en traçant le diagramme  $a = f(q)$ . Pour  $q/a = 2U/V$ , on trace une droite de fonctionnement permettant d'obtenir une trajectoire stable pour une gamme de  $m/z$  plus ou moins étroite avec un rapport  $U/V$  donné (Figure 12).

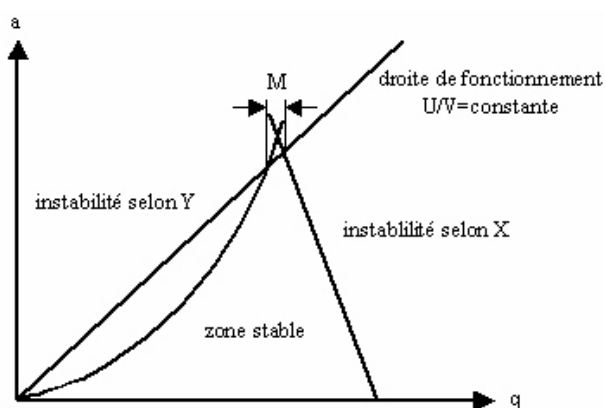


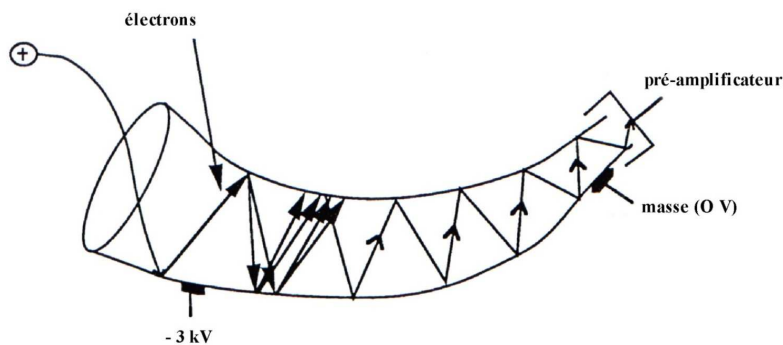
Figure 12 - Diagramme de stabilité de la trajectoire des ions.

La résolution en masse de l'appareil est directement liée à la pente de la droite de fonctionnement. En augmentant la valeur de la résolution, on accroît la pente de la droite mais on diminue le nombre d'ions ayant une trajectoire stable, et donc la sensibilité de l'instrument. Dans la majorité des cas, la résolution sera choisie de 0,8 uma (unité de masse atomique) à 5 % de la hauteur du pic.

Le quadripôle est donc utilisé en tant que filtre de masse séquentiel très rapide : quelques ms par balayage pour des valeurs de  $m/z$  de 6 à 250.

#### *f. La détection des ions*

La détection des ions s'effectue à l'aide d'un multiplicateur d'électrons secondaires de type Channeltron à dynode continue (Figure 13).



**Figure 13** - Schéma d'un multiplicateur d'électrons de type Channeltron.

Un ion frappant la partie évasée du détecteur, soumise à une tension négative, provoque l'émission d'électrons secondaires. Ceux-ci sont ensuite accélérés par un gradient de potentiel continu entre l'entrée du cône et sa base, reliée à la terre. Les impacts successifs sur le cône entraînent l'émission en cascade d'autres électrons secondaires. Ainsi, pour un ion détecté à l'entrée du multiplicateur seront émis environ  $10^8$  électrons en fin de processus, correspondant à un courant d'une dizaine de  $\mu\text{A}$ . Ce courant est amplifié puis traité.

Deux modes de détection des ions sont possibles :

- en mode EDR (*Extended Dynamic Range*) ou mode analogique, la tension d'alimentation du multiplicateur est de l'ordre de  $-1500\text{ V}$ , et seuls les éléments dont la concentration est élevée peuvent être détectés.
- en mode PC (*Pulse Counting*), la tension d'alimentation du multiplicateur est plus grande que pour le précédent mode ( $-3000\text{ V}$ ) et permet la détection des éléments présents à l'état de traces.

#### ***g. L'acquisition des données***

L'acquisition est réalisée à l'aide d'un analyseur multi-canal possédant 6000 canaux. Trois modes d'utilisation sont disponibles :

- un mode *scanning* (balayage) : il correspond à une variation continue des tensions U et V du quadripôle de manière à obtenir un spectre de masses continu, sans préjuger des éléments à doser. Ce mode convient pour une première approche d'échantillons de composition inconnue et permet de définir une stratégie analytique.

- un mode *peak jumping* (saut de pic) : l'acquisition ne prend en compte que les isotopes préalablement choisis par l'utilisateur. Les valeurs prises par U et V sont discontinues et l'acquisition est effectuée à hauteur de pic sur un ou plusieurs points par pic. Ce mode d'acquisition est le mieux adapté à l'analyse quantitative.

Le signal n'est mesuré que sur un seul ou quelques points qui correspondent au maximum du pic gaussien. Le mode « saut de pic » assure une sensibilité (rapport du signal de  $M^+$  sur la teneur de l'élément M) bien meilleure que celle obtenue en mode « balayage », qui tient compte de la surface du pic. Un à cinq points centrés sur le maximum du pic sont utilisés pour la mesure du signal. Outre les isotopes des éléments à doser, l'utilisateur choisit le temps de mesure par canal (ou *dwell-time*), le nombre de points mesurés par pic, et le nombre de balayages, déterminant la durée de l'analyse.

- un mode TRA (*Time Resolved Analysis*) ou analyse en temps réel : l'acquisition du signal est continue pendant une durée déterminée sur des isotopes définis à l'avance. On obtient ainsi une valeur de signal pour chaque intervalle de temps (de l'ordre de 125 ms) pour chaque isotope étudié. L'évolution du signal peut être suivie au cours du temps. Ce mode permet de calculer les teneurs des éléments dosés à chaque instant durant l'acquisition.

#### ***h. Le calcul des concentrations***

##### *i - Les menus d'analyse*

La détection des ions correspondant aux éléments majeurs très abondants et aux éléments mineurs et traces très peu concentrés, n'est pas effectuée simultanément. Le mode « dual », qui permet la détection en *Analogue* et en *Pulse Counting* dans le même temps, n'est pas utilisé : il n'est en effet pas possible de définir à l'avance quels seront les isotopes détectés dans l'un ou l'autre des deux modes. C'est la mesure du signal lors des premières secondes de l'acquisition qui conditionne cela. Il peut donc s'avérer, pour des éléments dont la teneur en surface diffère de celle de l'intérieur de l'échantillon, que le mode de détection choisi automatiquement ne soit pas approprié. Le mode « dual » est donc inadapté pour l'analyse d'échantillons dont la composition est susceptible de varier selon la profondeur comme les monnaies anciennes en argent.

L'analyse de l'ensemble des constituants des échantillons par LA-ICP-MS est ainsi séparée en deux parties distinctes : les isotopes recherchés sont rassemblés dans des menus d'analyse, auxquels est associé un mode de détection particulier (analogique pour les éléments majeurs et impulsionnel pour les éléments mineurs et traces).

##### *ii - L'étalonnage interne*

Le signal brut est susceptible de varier de façon significative d'une ablation à l'autre. Ce phénomène s'explique par des différences de structure de la matière entre les échantillons, par la variation des rendements d'ablation, de transport et

d'ionisation. Afin de s'affranchir de ces fluctuations, il est nécessaire de rapporter les intensités à celle d'un élément particulier, appelé étalon interne. Cette procédure d'étalonnage est efficace dans la mesure où l'on suppose que tous les éléments sont affectés de la même manière.

L'élément sélectionné pour remplir le rôle d'étalon interne doit répondre à certains critères. Les autres éléments ne doivent pas fractionner par rapport à l'étalon interne. Sa répartition au sein d'un échantillon donné doit être homogène, afin que sa teneur soit constante d'une mesure à l'autre. Cette teneur doit être largement supérieure aux limites de détection, pour que sa mesure soit entachée de la plus faible incertitude possible.

### *iii - La procédure de calcul*

Il n'existe aucune garantie de la reproductibilité de l'ablation et du transfert de la matière prélevée ; le signal brut obtenu pour un même élément peut donc être sujet à variation, d'une mesure à l'autre. Un moyen de s'affranchir de ce problème est de ne tenir compte que du rapport du signal de l'élément considéré sur celui d'un étalon interne qui aura subi les mêmes phénomènes au cours de l'analyse.

Cela revient à définir, pour chaque élément, un coefficient  $K_X$  qui constitue la pente de sa droite d'étalonnage, et qui représente sa sensibilité relative par rapport à l'élément choisi comme étalon interne.

Pour un élément quelconque X, présent dans l'échantillon à analyser, il s'exprime à l'aide de la relation suivante :

$$K_X = \frac{I_X}{[X]} \times \frac{[ei]}{I_{ei}}$$

$I_X$  et  $I_{ei}$  sont les intensités mesurées pour l'élément X et l'étalon interne dans l'échantillon.

$[X]$  et  $[ei]$  sont les teneurs de l'élément X et de l'étalon interne dans l'échantillon, grandeurs qui nous sont inconnues.

La relation ci-dessus, valable pour l'échantillon de composition inconnue, est valable pour l'échantillon de référence. Ainsi, le coefficient de sensibilité relative de l'échantillon de référence s'écrit :

$$K_X^{ref} = \frac{I_X^{ref}}{[X^{ref}]} \times \frac{[ei^{ref}]}{I_{ei}^{ref}}$$

Cette grandeur est calculable à partir d'une part, des données que l'on possède :  $[e_i^{\text{ref}}]$ ,  $[X^{\text{ref}}]$  et d'autre part, des résultats expérimentaux :  $I_X^{\text{ref}}$ ,  $I_{e_i}^{\text{ref}}$ .

La proximité de composition entre les échantillons archéologiques et les alliages de référence supposée permet d'admettre que :  $K_X = K_X^{\text{ref}}$ . Cela nous permet d'exprimer la teneur de l'élément X dans l'échantillon par :

$$[X] = \frac{I_X}{I_{e_i}} \times \frac{[e_i]}{K_X^{\text{ref}}}$$

La teneur en étalon interne de l'échantillon  $[e_i]$  nous est inconnue. On l'élimine de l'expression précédente en effectuant une normalisation à partir de tous les éléments présents dans l'échantillon. Cela est possible en supposant que la somme de toutes les teneurs est égale à 100 %, ainsi :

$$[x] = \frac{\frac{I_x \cdot [e_i]}{I_{e_i} \cdot K_x^{\text{ref}}}}{\sum \frac{I_{x'} \cdot [e_i]}{I_{e_i} \cdot K_{x'}^{\text{ref}}}}$$

qui devient :

$$[x] = \frac{\frac{I_x}{I_{e_i} \cdot K_x^{\text{ref}}}}{\sum \frac{I_{x'}}{I_{e_i} \cdot K_{x'}^{\text{ref}}}}$$

#### *iv - Les interférences*

La séparation des ions à l'aide d'un quadripôle permet une résolution en masse de l'ordre de un. La détection d'espèces chargées différentes mais de masse identique est susceptible de se produire. Il peut donc arriver que la mesure du signal d'un isotope que l'on souhaite doser soit perturbée par celui d'un élément dont la masse ne peut être résolue de celle de l'isotope désiré. Ce phénomène est qualifié d'interférence.

Il en existe trois types différents :

- les interférences isobariques,
- les interférences par formation d'espèces doublement chargées,
- les interférences polyatomiques.

*Les interférences isobariques* : deux éléments peuvent avoir des isotopes avec des masses atomiques très voisines (par exemple  $^{115}\text{Sn}$  et  $^{115}\text{In}$ ), et donc impossibles à résoudre avec un quadripôle électrostatique comme celui dont nous disposons. Ces interférences peuvent être corrigées avec l'utilisation d'un isotope non interféré de l'élément à déterminer, ou par soustraction de la participation de l'isotope interférant calculée, sur un autre isotope de masse proche.

*Les espèces doublement chargées* : ces interférences sont dues à la formation d'espèces doublement chargées dans le plasma. Tous les éléments ayant un potentiel de seconde ionisation inférieur à celui de l'argon (15,8 eV) peuvent former ce genre d'ions. Ceux-ci sont détectés à leur masse atomique divisée par deux.

*Les interférences polyatomiques* : ce sont les interférences les plus importantes rencontrées en ICP-MS. Elles sont surtout gênantes pour des masses atomiques inférieures à 80. Ce type d'interférence est dû à une recombinaison au niveau de la surface du cône, de plusieurs atomes chargés, de masses atomiques différentes. Ce phénomène est lié à la différence de températures importante entre le plasma et le cône. Par exemple, le composé  $\text{ArO}^+$  dû à une recombinaison de l'argon et de l'oxygène, présent soit dans l'échantillon soit dans l'argon s'il n'est pas de grande pureté, est susceptible d'interférer avec les ions  $\text{Fe}^+$  ( $m = 56$ ) qui ont le même rapport  $m/z$ .

## **II. Mise au point du protocole analytique**

### **1. La méthode LA-ICP-MS en archéométrie**

Les premières applications de la méthode LA-ICP-MS à des objets archéologiques remontent au début des années 1990. L'expérience acquise en géologie a permis un essor rapide de cette technique en archéométrie tout d'abord pour les verres anciens et les objets en obsidienne (Gratuze, 1999 ; Gratuze *et al.*, 1993a ; Gratuze *et al.*, 2001 ; Gratuze *et al.*, 1993b ; Speakman *et al.*, 2002). Des silex ainsi que des céramiques ont par la suite également été étudiés par LA-ICP-MS (Blet, 1999 ; Neff *et al.*, 1999 ; Neff *et al.*, 2003 ; Rautman *et al.*, 1999).

La méthode LA-ICP-MS a été appliquée aux métaux ferreux principalement pour caractériser les éléments-traces contenus dans des inclusions vitreuses (Devos *et al.*, 2000).

Les trois grands types d'alliages monétaires anciens à base d'or, d'argent et de cuivre possèdent des caractéristiques très différentes qui doivent être prises en compte pour leur analyse. L'existence d'une ou plusieurs phases métallurgiques conditionne par exemple l'échelle à partir de laquelle l'analyse sera représentative de l'échantillon dans son ensemble ; des variations de composition selon la profondeur peuvent également exister, en particulier du fait de la corrosion. Au sein d'un même type d'alliage, les différences de structure peuvent de surcroît être importantes et justifier d'une approche spécifique. En conséquence, chaque type d'alliage monétaire doit bénéficier d'un protocole analytique permettant la prise en compte de l'ensemble de ses caractéristiques de composition et de structure.

Les monnaies constituées d'un alliage à base d'or sont d'une manière générale homogènes, et ne présentent pas de corrosion importante comme celles d'argent. L'analyse de tels échantillons par LA-ICP-MS peut donc se pratiquer de la même manière que pour les matrices vitreuses : le signal correspondant à la matière prélevée progressivement est accumulé tout au long de l'ablation, et une unique valeur est obtenue pour chacun des isotopes dosés (« Average Single Spot Analysis »). La principale limitation pour l'application de la méthode LA-ICP-MS à ce type de matériau était l'absence d'alliages de référence disponibles sur le marché. La méthode LA-ICP-MS a néanmoins pu être développée pour la caractérisation d'alliages monétaires à base d'or, en particulier pour répondre à des problématiques de provenance des métaux précieux utilisés (Dussubieux et van Zelst, 2004 ; Gondonneau et Guerra, 2002 ; Gondonneau *et al.*, 1996 ; Gratuze *et al.*, 2004 ; Guerra *et al.*, 1999).

Enfin, certains alliages cuivreux archéologiques ont récemment été analysés avec succès par LA-ICP-MS (Dussubieux *et al.*, 2008).

Les monnaies anciennes constituées d'un alliage d'argent présentent, contrairement à celles d'or ou aux matériaux vitreux, des hétérogénéités de composition importantes selon la profondeur. Cette caractéristique implique une approche différente de celle employée pour les matériaux archéologiques analysés jusqu'à maintenant par LA-ICP-MS : une analyse classique en « Average Single Spot Analysis » est inadaptée car elle ne permet pas de rendre compte des variations de composition des alliages entre surface et intérieur, et donc de s'en affranchir.

Par le passé, quelques investigations ponctuelles par LA-ICP-MS ont néanmoins été entreprises sur des objets anciens en argent. Cette méthode a été utilisée par exemple pour authentifier des objets d'art anciens selon la présence de



certaines éléments-traces (Devos *et al.*, 1999). La méthode LA-ICP-MS a également été utilisée de manière qualitative afin d'identifier la présence de mercure dans des argentes de monnaies romaines pour mettre en évidence la procédure de dépôt d'argent à l'amalgame (Vlachou-Mogire *et al.*, 2007).

Aucune de ces études n'a toutefois entrepris de caractériser à la fois les constituants majeurs, mineurs et traces des monnaies, et aucune n'a pris en compte l'existence d'un enrichissement de surface pour analyser ces objets.

## **2. L'analyse des métaux par LA-ICP-MS**

L'analyse des métaux modernes n'impose pas que la méthode employée soit non destructive, comme c'est le cas pour les archéomatériaux en général et pour les monnaies anciennes en particulier. Les méthodes de caractérisation utilisées en métallurgie moderne sont des méthodes destructives. La méthode LA-ICP-MS n'est donc que peu répandue pour l'analyse d'alliages industriels à l'heure actuelle, et la bibliographie dans ce domaine est en conséquence relativement mince.

Les premières publications traitant de l'application de la méthode LA-ICP-MS pour l'étude des métaux modernes concerne l'analyse d'aciers (Raith *et al.*, 1995 ; Yasuhara *et al.*, 1992).

Les études les plus nombreuses concernant l'analyse des métaux modernes non-ferreux par LA-ICP-MS traitent des alliages cuivreux. Des publications récentes portent en particulier sur le fractionnement isotopique du cuivre et de ses alliages (Jackson et Günther, 2003 ; Kuhn et Günther, 2003 ; Kuhn *et al.*, 2007). Une autre étude traite de la comparaison des lasers femtoseconde et nanoseconde pour l'ablation de laitons (Liu *et al.*, 2004). En outre, l'emploi d'un laser femtoseconde a été évalué pour l'analyse de laitons sans utiliser de matériaux de référence pour un étalonnage externe (Bian *et al.*, 2006). Des modélisations ont également été effectuées dans le but d'étudier l'ablation laser du cuivre en utilisant différents gaz vecteurs (Bogaerts *et al.*, 2006).

Une publication récente fait état du dosage par LA-ICP-MS du platine, du palladium et du rhodium dans des boutons de plomb obtenus suite à l'essai par coupellation de minerais riches en platine (Vanhaecke *et al.*, 2004).

Concernant l'analyse des métaux précieux, l'or est le métal ayant fait l'objet du plus grand nombre de publications. Les teneurs de certains éléments-traces ont été utilisées pour déterminer la provenance du métal jaune (Kogan *et al.*, 1994 ; McCandless *et al.*, 1997 ; Watling *et al.*, 1994). Des recherches similaires

ont également été entreprises pour l'argent (Kogan *et al.*, 1994). Cependant, d'une manière générale, les alliages modernes à base d'argent n'ont pas véritablement fait l'objet de recherches approfondies concernant par exemple le fractionnement isotopique durant l'ablation ou l'influence des différents paramètres caractérisant l'ablation laser comme cela a été le cas pour les alliages cuivreux. Nous n'aurons donc d'autre support pour cette étude que celui constitué par les recherches antérieures qui ont porté sur l'analyse des alliages à base de cuivre. Nous tenterons de transposer les connaissances acquises antérieurement aux monnaies d'argent, connaissant leurs caractéristiques générales de composition et de structure.

### **3. La cellule d'ablation laser**

Certaines études antérieures portant sur l'enrichissement de surface évoquées dans la première partie de cette thèse ont mis en évidence un phénomène de « recouvrement » des couches perturbées présentes sur chacune des faces des monnaies (Condamin et Picon, 1964a ; Condamin et Picon, 1964b ; Condamin et Picon, 1972 ; Guey, 1965). Lorsque les monnaies sont recouvertes d'une couche superficielle enrichie en argent, il semble donc qu'elle soit plus importante sur leur tranche que sur leur face.

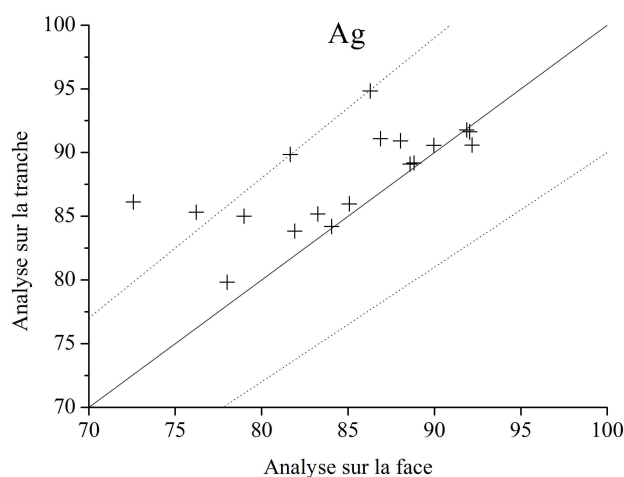
La méthode LA-ICP-MS, telle que nous souhaitons l'appliquer aux monnaies d'argent, doit permettre d'analyser les constituants majeurs de ces alliages en profils de concentration. Il devra donc être possible de s'affranchir d'une éventuelle couche de surface perturbée afin d'analyser l'alliage dont la composition n'a pas été modifiée. En conséquence, une analyse des monnaies d'argent sur leur tranche ne peut être envisagée eu égard au phénomène de recouvrement présenté plus haut : il est en effet probable que l'ablation laser ne permette pas, dans de nombreux cas, de passer outre la couche superficielle enrichie en argent en procédant de la sorte. Une analyse des monnaies sur leur face est donc préférable.

Les résultats d'analyses effectuées par LA-ICP-MS sur la face et sur la tranche de monnaies carolingiennes justifient ce choix (Figure 14<sup>2</sup>). Pour cinq des dix-huit échantillons étudiés, soit plus de 25 % d'entre eux, l'écart relatif entre les teneurs en argent obtenues est supérieur à 5 %. Cela signifie que l'analyse des monnaies d'argent sur leur tranche peut conduire à une surestimation non négligeable de la teneur en argent de l'alliage sain. Les pièces pour lesquelles les écarts les plus importants ont été observés ne sont pas uniquement celles contenant effectivement le moins d'argent, si l'on prend pour référence la teneur déterminée lors de l'analyse sur la face supposée refléter la composition de l'alliage sain.

---

<sup>2</sup> Les valeurs correspondant aux points représentés sur cette figure sont reportées en Annexe 2.

L'écart peut être minime ou supérieur à 5 % relatifs pour des monnaies dont la teneur en argent dans l'alliage sain est très proche. Le phénomène d'enrichissement de surface plus important sur la tranche des monnaies ne dépend pas uniquement du titre initial de l'alliage. Le caractère imprévisible de ce phénomène est ainsi mis en évidence.



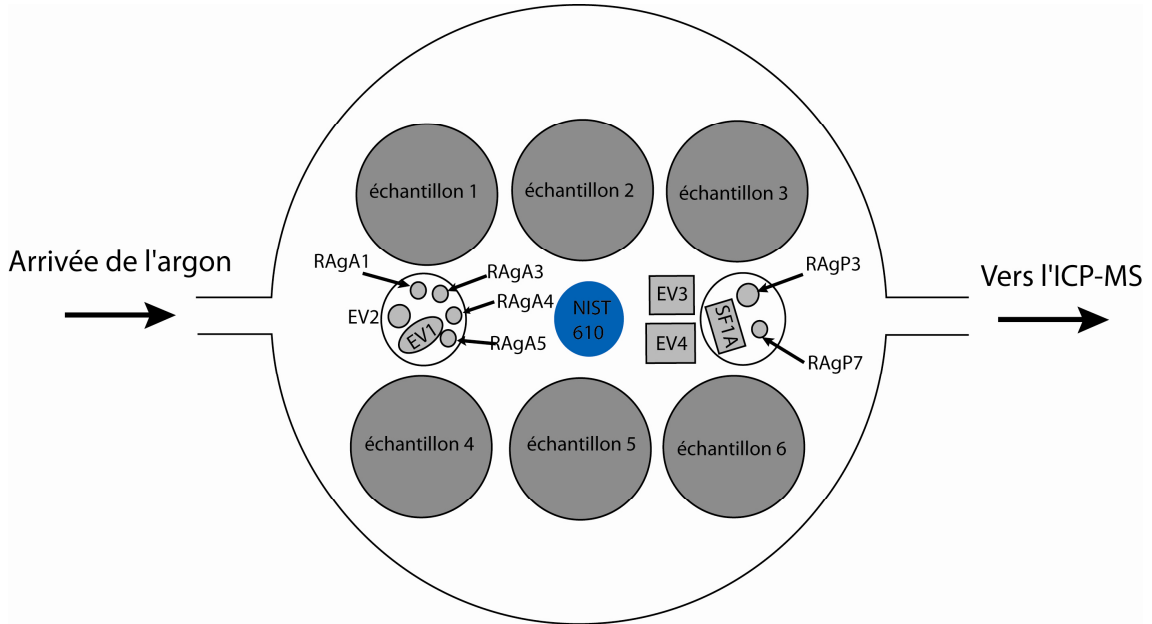
**Figure 14** - Comparaison des teneurs en argent déterminées sur la tranche et la face de mêmes monnaies par LA-ICP-MS. En trait plein, la première bissectrice d'équation  $y=x$ . En pointillés, les droites représentant un écart de 5 % relatifs. Toutes valeurs en pourcents.

Les pièces analysées dans le but d'étudier les variations de composition entre la tranche et la face sont toutes d'un titre d'argent supérieur à 70 %. Les monnaies contenant moins d'argent sont encore plus susceptibles de présenter des couches de surface enrichies en argent d'épaisseurs importantes. Il est donc tout à fait inapproprié, quelle que soit la teneur en argent de l'alliage monétaire, d'effectuer l'analyse par LA-ICP-MS sur la tranche de ces objets, en particulier pour les monnaies fines.

L'impératif d'analyser les pièces d'argent sur leur face conditionne la géométrie et la taille de la cellule qui doit contenir ces échantillons. La cellule d'ablation développée pour l'analyse des monnaies d'argent est cylindrique et mesure 8 cm de diamètre et 3 cm de hauteur, soit un volume de  $150,7 \text{ cm}^3$ .

Le nombre de pièces qu'il est possible d'analyser dans une même cellule est limité par leur diamètre. La cellule d'ablation utilisée habituellement pour l'analyse des monnaies d'argent peut contenir six monnaies d'un diamètre de l'ordre de 20 mm, les alliages de référence utilisés pour le calcul des teneurs en éléments majeurs et en éléments mineurs et traces, ainsi qu'un verre de référence (NIST 610) utilisé en début de séance pour le réglage de l'appareil.

Les monnaies sont disposées dans la cellule d'ablation comme présenté en taille réelle sur la Figure 15. Les échantillons représentés sur ce schéma sont d'un diamètre de 20 mm, valeur courante pour les pièces anciennes à base d'argent. Une photographie de la cellule d'ablation laser contenant des monnaies apparaît sur la Figure 16.



**Figure 15** - Schéma en taille réelle d'une cellule d'ablation type contenant des monnaies d'argent, les alliages de référence spécifiques à l'analyse de ce type d'échantillons (EVX, RAgAX, RAgPX et SF1A) et le verre de référence NIST 610.



**Figure 16** - Photographie de la cellule d'ablation contenant des monnaies d'argent.

Il a été démontré que la taille de la cellule d'ablation influence directement le rendement d'ablation (Bleiner et Günther, 2001). La matière prélevée se disperse davantage dans une cellule de volume important, et la densité de matière dans l'aérosol transporté jusqu'à la torche à plasma diminue quand le volume de la cellule augmente. La cellule utilisée au Centre Ernest Babelon pour l'analyse des monnaies d'argent est relativement volumineuse en comparaison avec celles utilisées généralement dans d'autres domaines que l'archéométrie, dont la contenance est souvent de l'ordre de  $30 \text{ cm}^3$  : son volume « efficace » est d'environ  $100 \text{ cm}^3$ .

Une étude réalisée sur des cellules d'ablation de volumes compris entre  $0,1 \text{ cm}^3$  et  $63 \text{ cm}^3$  a démontré que l'influence du volume de la cellule sur la densité de matière dans le flux de gaz porteur devient minime au-delà de  $20 \text{ cm}^3$  environ (Bleiner et Günther, 2001).

Une autre étude a démontré que le rendement entre la quantité de matière prélevée et la quantité de matière parvenant à la torche à plasma est sensiblement identique (autour de 9 %) pour deux cellules cylindriques dont les volumes respectifs sont de  $30 \text{ cm}^3$  et  $98 \text{ cm}^3$  (Bleiner et Bogaerts, 2006). On peut donc imaginer que le rendement de notre cellule, dont le volume « efficace » est de l'ordre de  $100 \text{ cm}^3$ , est proche de cette valeur.

Les monnaies à analyser ainsi que les alliages de référence sont placés à une hauteur légèrement inférieure à celle des arrivées et sorties de gaz porteur afin d'optimiser le transport de la matière prélevée et donc le signal acquis (Bleiner et Günther, 2001).

Les caractéristiques de composition des monnaies d'argent imposent l'utilisation de modes d'acquisition, de détection, et de paramètres d'ablation différents selon la concentration de leurs constituants. A l'image de ce qui a été défini pour l'analyse du verre et de l'or par LA-ICP-MS (Gratuze *et al.*, 2001 ; Gratuze *et al.*, 2004), la caractérisation des monnaies d'argent est opérée en deux parties distinctes : d'une part, l'analyse des éléments majeurs ; d'autre part, celle des éléments mineurs et traces. La principale différence entre les protocoles d'analyse définis pour l'or ou le verre et celui que nous nous proposons de développer pour les monnaies d'argent est le mode d'acquisition : les variations de composition selon la profondeur observées fréquemment sur ce type d'échantillon imposent la définition de paramètres analytiques permettant la visualisation de l'évolution des concentrations entre la surface et l'intérieur.

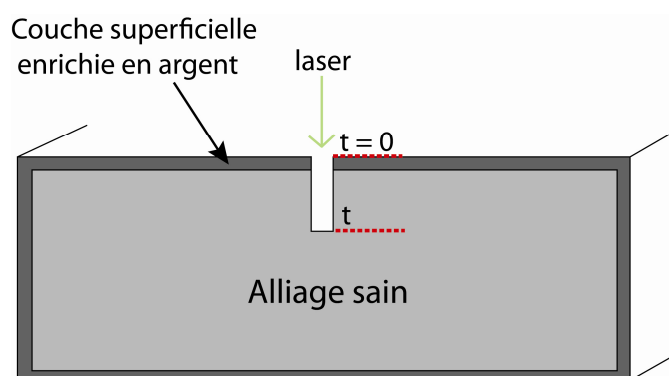
Les paragraphes qui suivent présentent les caractéristiques des protocoles analytiques définis pour l'analyse des éléments majeurs d'abord, puis pour celle des éléments mineurs et traces.

#### 4. L'analyse des éléments majeurs en profils de concentration

L'analyse des éléments majeurs contenus dans les monnaies d'argent doit permettre un dosage précis et représentatif de ces constituants, et rendre compte des variations de composition susceptibles d'affecter ces échantillons. Les alliages monétaires argent-cuivre que l'on souhaite pouvoir analyser – du moins dans un premier temps – sont ceux dont le titre d'argent est relativement élevé : la gamme de teneurs principalement visée s'étend de la composition de l'alliage eutectique Ag-Cu, soit 71,59 % d'argent, jusqu'à près de 100 % d'argent.

Le mode de micro-prélèvement particulier qu'est l'ablation laser a été spécifiquement exploité pour l'analyse des éléments majeurs contenus dans les monnaies d'argent : le laser est focalisé à la surface de l'échantillon au début de l'analyse, puis progresse en profondeur à chaque impact (Figure 17).

Si l'on combine ce mode de prélèvement à une acquisition du signal en temps réel, il est possible d'obtenir des profils de concentration représentant l'évolution des teneurs des différents éléments dosés en fonction de la durée de l'ablation. Ainsi, il devrait être possible, dans le cas des monnaies d'argent, de distinguer sur ces profils une première zone qui correspond à l'enrichissement de surface, puis une seconde qui se rapporte à l'alliage sain et qui sera utilisée pour le dosage des concentrations.



**Figure 17** - Schéma représentant une coupe de monnaie avec une couche superficielle enrichie en argent, ainsi que la pénétration du laser dans l'échantillon durant l'ablation.

### ***a. Les profils de concentration par LA-ICP-MS dans la littérature***

La possibilité offerte par la méthode LA-ICP-MS d'analyser les échantillons en réalisant des profils de concentration n'a jamais été appliquée par le passé à l'étude de matériaux dont la composition varie progressivement avec la profondeur. Cette spécificité de la méthode LA-ICP-MS a en revanche été exploitée pour caractériser des matériaux multicouches. Des couches d'alliages dont l'épaisseur peut varier de quelques micromètres à plusieurs centaines de micromètres, déposées à la surface d'un autre matériau pour en modifier les propriétés, ont en particulier été étudiées (Coedo *et al.*, 2005 ; Kanický *et al.*, 2004 ; Margetic *et al.*, 2001 ; Mason et Mank, 2001 ; Plotnikov *et al.*, 2001). Dans ces publications, la finalité n'est pas comme dans notre cas de déterminer la composition d'un matériau situé sous une couche ne présentant pas d'intérêt, mais plutôt d'optimiser la résolution en profondeur pour déterminer l'épaisseur de la couche superficielle. Des recherches similaires existent en archéométrie, en particulier pour l'étude de dorures ou d'argentures à la surface de monnaies (Vlachou-Mogire *et al.*, 2007).

D'une manière générale comme dans le cas de l'étude de couches fines modernes, l'utilisation de lasers femtoseconde est préférable à celle de lasers nanoseconde : la durée plus courte de l'impact du laser sur l'échantillon permet de réduire la part d'ablation thermique qui provoque la fusion du matériau. Ce phénomène crée des mélanges entre les différentes couches et peut être à l'origine d'une mauvaise résolution en profondeur (Margetic *et al.*, 2001).

L'utilisation d'un laser nanoseconde, comme celui utilisé au Centre Ernest Babelon, n'est néanmoins pas problématique pour l'analyse des monnaies d'argent : il ne s'agit en effet pas à proprement parler d'un matériau multicouches mais d'un alliage dont la composition est susceptible d'évoluer selon la profondeur ; le mélange de quelques fractions de micromètres de matière n'est dans ce cas pas dommageable puisqu'il s'agit d'atteindre l'alliage sain pour déterminer sa composition.

### ***b. Définition des paramètres analytiques pour la caractérisation des éléments majeurs en profils de concentration***

#### *i - Préambule*

Les paragraphes suivant celui-ci concernent la définition des paramètres analytiques pour l'analyse des éléments contenus dans le « menu majeur » pour la caractérisation des monnaies d'argent par LA-ICP-MS. Chacun d'entre eux s'attache à présenter spécifiquement un de ces paramètres, et discute du choix

d'une valeur ou d'une façon de procéder en s'appuyant sur des expérimentations réalisées dans ce but. Dans les faits, la définition des paramètres ne s'est pas faite exactement de cette manière : lors des premières expérimentations sur des alliages modernes et sur des monnaies anciennes, certains paramètres ont dû être fixés arbitrairement afin d'étudier l'influence de certains autres ; les expérimentations ultérieures ont par la suite permis de préciser chacun d'entre eux.

Les essais visant à définir les paramètres expérimentaux pour l'analyse des monnaies d'argent par LA-ICP-MS ont été réalisées à la fois sur des alliages modernes et sur des exemplaires anciens. La plus grande part des pièces d'argent anciennes étudiées dans cette optique est constituée de deniers carolingiens émis à la fin du VIII<sup>e</sup> siècle et au début du IX<sup>e</sup> siècle. La composition attendue de ces alliages, ainsi que des problématiques historiques liées à la frappe et à la circulation monétaires durant le haut Moyen Age, ont motivé le choix de ces monnaies.

Les monnaies d'argent carolingiennes sont supposées être d'un titre d'argent élevé, si l'on se base sur les textes anciens régissant la frappe monétaire, ainsi que sur la plupart des analyses effectuées antérieurement sur des exemplaires similaires. La pureté élevée de ces monnaies constituait, lorsque les bases de cette étude ont été définies, une raison de les utiliser pour développer l'application de la méthode LA-ICP-MS à l'analyse des pièces d'argent : il s'agissait à l'origine d'évaluer la pertinence de cette approche sur des monnaies de bon titre, supposées présenter un enrichissement de surface modéré, et où la répartition des éléments dans l'alliage sain est présumée homogène. Il s'est finalement avéré que le titre de certaines de ces monnaies n'était pas aussi élevé qu'attendu ; de plus, des couches superficielles enrichies en argent d'épaisseurs importantes, ainsi que des hétérogénéités de composition à l'intérieur des alliages, sont apparues à mesure que le nombre de monnaies étudiées augmentait. La problématique initiale s'en est alors trouvée passablement modifiée : les premières analyses ayant conduit à la définition de conditions expérimentales pour des alliages homogènes et riches en argent, il s'est alors agi d'évaluer, à partir de monnaies des mêmes souverains, les possibilités de la méthode LA-ICP-MS pour l'analyse de monnaies d'un titre plus faible et présentant une couche de surface enrichie en argent relativement épaisse.

En plus des monnaies carolingiennes, d'autres *corpus* plus restreints présentant des caractéristiques physiques différentes – en particulier d'épaisseur, nous verrons par la suite que ce paramètre revêt une importance particulière pour la validation du protocole analytique – ont également été étudiés dans cette optique. Plus de cinq cents pièces au total ont été analysées. La majorité d'entre elles contient plus de 70 % d'argent : le but premier de cette étude est en effet d'évaluer



la pertinence de l'application de la méthode LA-ICP-MS aux monnaies d'argent de titre relativement élevé. Une proportion plus faible, mais néanmoins non négligeable, de l'ensemble des monnaies contient quant à elle de 20 % à 70 % d'argent seulement. Il s'agissait pour ces échantillons d'apporter des premiers éléments de réflexion afin d'étendre à ce type d'alliage le protocole développé pour ceux d'un titre d'argent plus élevé.

Les paramètres expérimentaux pour la caractérisation des pièces d'argent par LA-ICP-MS ont été définis principalement à partir de l'étude exhaustive de la collection de monnaies des premiers carolingiens du Cabinet des Médailles de la Bibliothèque nationale de France. L'analyse de certains *corpus* monétaires pourra nécessiter l'ajustement de certains de ces paramètres : le protocole d'analyse des monnaies d'argent tel qu'il est défini dans cette partie ne doit pas être considéré comme une structure rigide ; il s'agit davantage d'une large investigation visant à évaluer la pertinence de la méthode LA-ICP-MS pour la caractérisation des monnaies d'argent, et d'une source d'informations pour aider à la définition de paramètres analytiques spécifiques pour l'analyse future de *corpus* monétaires divers. Les paramètres précisés dans la suite de ce texte – du moins quelques-uns d'entre eux – pourront être adaptés aux caractéristiques de composition et de structure des monnaies que l'on souhaite analyser.

L'analyse élémentaire des monnaies émises à la fin du VIII<sup>e</sup> siècle et au début du IX<sup>e</sup> siècle par les premiers carolingiens présente également un intérêt d'un point de vue numismatique et d'un point de vue historique. Ces problématiques sont développées dans la seconde partie de cette thèse.

Les courbes d'évolution du signal brut ainsi que les profils de concentration présentés dans cette thèse ne représentent pas exactement les calculs tels qu'ils auraient été effectués à partir des valeurs brutes de signal fournies par le logiciel de l'ICP-MS. Deux raisons principales ont motivé cette démarche.

La première est liée au caractère biphasé des alliages argent-cuivre d'un titre inférieur à 91,73 % d'argent, et constituant une part importante de l'ensemble des monnaies analysées. L'existence de deux phases implique que les variations instantanées de composition que l'on observerait en calculant les teneurs correspondant à chaque valeur de signal brut fourni par le logiciel, c'est-à-dire environ huit par seconde (et donc plus que le nombre d'impacts laser), entraînerait des écarts importants sur des durées très courtes. L'approche analytique des monnaies d'argent par LA-ICP-MS développée ici vise certes à visualiser des évolutions de composition au sein de ces alliages, néanmoins les variations liées au

caractère biphasé de certains d'entre eux ne présentent pas d'intérêt, et risquent de fausser la lecture des profils de concentration. En conséquence, les courbes représentant l'évolution des teneurs des éléments dosés dans le menu d'analyse des éléments majeurs sont calculées à partir d'une moyenne du signal correspondant à 2 à 3 s, soit 10 à 15 impacts laser.

Une seconde raison s'ajoute à la première, celle-ci d'ordre pratique : elle concerne la taille des fichiers informatiques correspondant aux analyses par LA-ICP-MS en profils de concentration. Le logiciel utilisé fournit huit valeurs de signal par seconde pour chaque isotope dosé, pour chaque prélèvement effectué sur les échantillons et pour chacun des alliages de référence utilisés pour le calcul des compositions. Les fichiers contenant ces données, de par leur taille très importante, posent non seulement un problème de stockage sur le long terme, mais sont surtout source de ralentissement du traitement lors des calculs des concentrations. C'est donc également en raison de la taille des fichiers regroupant les valeurs de signal et le calcul des compositions des échantillons qu'il a été décidé de déterminer des moyennes de signal brut correspondant à quelques secondes pour la représentation de l'évolution des teneurs au cours de l'ablation laser.

## *ii - Les éléments dosés et le choix des isotopes*

### *(i) - Les éléments dosés*

Les monnaies anciennes en argent sont pour une grande majorité constituées d'un alliage argent-cuivre. L'argent, constituant principal des pièces, doit être analysé en tant qu'élément majeur. Le cuivre, s'il peut pour certaines monnaies très pures être seulement à l'état de trace, doit également être dosé en tant qu'élément majeur car sa teneur est le plus souvent comprise entre quelques pourcents et plusieurs dizaines de pourcents.

Les analyses antérieures de monnaies ont mis en évidence la présence de plusieurs éléments mineurs que nous qualifierons de « principaux ». Les deux éléments mineurs principaux présents le plus souvent à des teneurs relativement élevées sont le plomb et l'or. Il n'est pas rare que les teneurs de ces deux éléments atteignent 1 %, voire davantage, en particulier pour le plomb. Trois autres éléments peuvent présenter des teneurs relativement importantes pour certains *corpus* ou certaines monnaies, ce qui justifie leur analyse conjointement aux éléments majeurs : le zinc, l'étain et le bismuth. Les teneurs en zinc et en étain peuvent, en particulier dans les cas où l'argent utilisé pour la frappe monétaire a été mélangé à un laiton ou à un bronze plutôt qu'à du cuivre pur pour l'affaiblir, atteindre 1 % ou

même plusieurs pourcents. Certaines sources d'argent peuvent enfin présenter des teneurs en bismuth élevées, de l'ordre de quelques dixièmes de pourcent, voire du pourcent.

La détection des ions dans le menu d'analyse des éléments majeurs pour les monnaies d'argent se fait en mode « Analogue ». Ce mode permet l'acquisition de signaux importants, il est donc particulièrement indiqué pour l'analyse de ces éléments. Les ions correspondant aux éléments mineurs et traces peu concentrés sont pour leur part détectés en mode « Pulse Counting », qui permet la mesure de signaux faibles. Mais quelles sont les teneurs limites des différents éléments dosés dans les deux cas ? Certains éléments mineurs peuvent être, comme nous venons de le voir, relativement abondants. Il est cependant difficile de prévoir les teneurs de ces éléments au sein des alliages. En conséquence, les cinq éléments mineurs principaux sont dosés à la fois dans le menu d'analyse des éléments majeurs, avec l'argent et le cuivre, et dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces, conjointement à une liste d'autres éléments très peu concentrés. Nous verrons plus loin quelles sont les teneurs pour lesquelles l'une ou l'autre de ces deux approches devra être privilégiée pour les cinq éléments mineurs principaux.

Les éléments déterminés en profils de concentration en tant qu'éléments majeurs dans notre protocole d'analyse des monnaies d'argent par LA-ICP-MS sont donc au nombre de sept : l'argent et le cuivre, ainsi que le zinc, l'étain, l'or, le plomb et le bismuth.

#### (ii) - Le choix des isotopes

L'argent et le cuivre possèdent chacun deux isotopes stables relativement abondants. Pour l'argent,  $^{107}\text{Ag}$  représente 51,84 % de l'ensemble, et  $^{109}\text{Ag}$  48,16 % (Lide, 1991)<sup>3</sup>. Pour le cuivre, les proportions respectives sont de 69,17 % pour  $^{63}\text{Cu}$  et de 30,83 % pour  $^{65}\text{Cu}$ . Les deux isotopes de l'argent et du cuivre sont systématiquement détectés dans le menu d'analyse des éléments majeurs.

Pour les cinq éléments mineurs principaux analysés dans le menu d'analyse des éléments majeurs, le ou les isotopes choisis doivent être abondants afin d'obtenir un maximum de signal et de minimiser les incertitudes. Il convient toutefois de veiller à ce que ces isotopes soient libres de toute interférence.

---

<sup>3</sup> L'ensemble des valeurs d'abondance isotopique naturelle présentées dans ce paragraphe et dans les suivants sont reprises d'après cette même référence.

La question du choix des isotopes ne se pose pas pour les espèces mono-isotopiques incluses dans ce menu d'analyse : c'est le cas de l'or et du bismuth, pour lesquels les isotopes respectifs  $^{197}\text{Au}$  et  $^{209}\text{Bi}$  sont les seuls qui existent à l'état naturel.

Cinq isotopes du zinc existent à l'état naturel ; parmi eux, trois sont suffisamment abondants naturellement pour que l'on envisage leur détection dans le menu d'analyse des éléments majeurs par LA-ICP-MS :  $^{64}\text{Zn}$  (abondance relative de 48,6 %) ;  $^{66}\text{Zn}$  (27,9 %) ;  $^{68}\text{Zn}$  (18,8 %). Le choix de l'isotope  $^{64}\text{Zn}$  n'est pas judicieux : situé exactement entre les deux isotopes du cuivre  $^{63}\text{Cu}$  et  $^{65}\text{Cu}$ , une mauvaise déconvolution des pics mesurés pour chacun de ces isotopes pourrait entraîner une surestimation du signal correspondant effectivement à  $^{64}\text{Zn}$ . L'isotope  $^{66}\text{Zn}$  a également été éliminé du fait du risque de mauvaise déconvolution du pic de cet isotope avec celui de  $^{65}\text{Cu}$ , proche et susceptible d'être très important. En conséquence, seul l'isotope de masse 68 du zinc est mesuré dans ce menu d'analyse.

L'étain possède dix isotopes stables à l'état naturel. L'abondance relative de trois d'entre eux permet d'envisager leur détection dans le menu d'analyse des éléments majeurs en profils de concentration :  $^{116}\text{Sn}$ ,  $^{118}\text{Sn}$  et  $^{120}\text{Sn}$  ; les isotopes mesurés durant l'analyse des éléments majeurs sont  $^{116}\text{Sn}$  et  $^{118}\text{Sn}$ , dont les abondances naturelles respectives sont de 14,5 % et 24,2 %. L'interférence isobarique existant entre  $^{116}\text{Sn}$  et  $^{116}\text{Cd}$  n'est en effet pas dommageable dans ce menu d'analyse car le cadmium est présent seulement à l'état de trace dans les alliages monétaires à base d'argent, et l'isotope 116 ne représente que 7,49 % de l'abondance naturelle totale de cet élément. L'isotope  $^{120}\text{Sn}$  n'a en revanche pas été retenu du fait de la possibilité de recombinaison de  $^{40}\text{Ar}$  en  $^{40}\text{Ar}_3^+$ , susceptible d'interférer.

Trois des quatre isotopes du plomb présentent des abondances naturelles suffisamment élevées pour que l'on envisage leur détection dans le menu d'analyse des éléments majeurs :  $^{206}\text{Pb}$  (24,1 %),  $^{207}\text{Pb}$  (22,1 %) et  $^{208}\text{Pb}$  (52,4 %). Les deux isotopes les plus abondants  $^{206}\text{Pb}$  et  $^{208}\text{Pb}$  ont été choisis pour être mesurés dans le menu d'analyse des éléments majeurs.

Les isotopes que nous mesurons lors de l'analyse des monnaies d'argent en profils de concentration par LA-ICP-MS sont donc :  $^{63}\text{Cu}$  ;  $^{65}\text{Cu}$  ;  $^{68}\text{Zn}$  ;  $^{107}\text{Ag}$  ;  $^{109}\text{Ag}$  ;  $^{116}\text{Sn}$  ;  $^{118}\text{Sn}$  ;  $^{197}\text{Au}$  ;  $^{206}\text{Pb}$  ;  $^{208}\text{Pb}$  ;  $^{209}\text{Bi}$ .

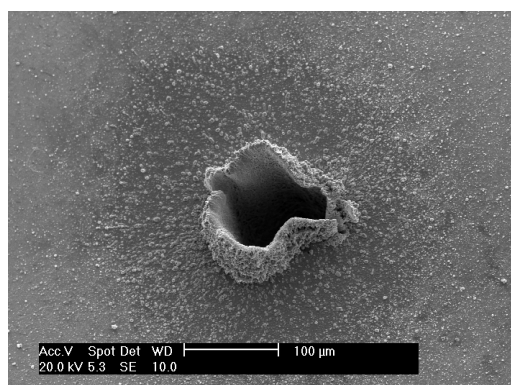
*iii - Les paramètres de l'ablation laser : la taille des micro-prélèvements*

La définition des paramètres de l'ablation laser joue un rôle crucial pour la validité du protocole d'analyse des monnaies d'argent par LA-ICP-MS. Le choix du diamètre des cratères d'ablation revêt une importance primordiale pour la pertinence de l'application de cette méthode à l'analyse des monnaies d'argent.

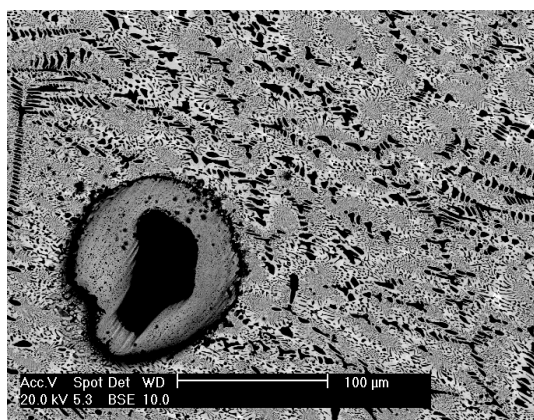
Deux impératifs liés à la taille des cratères d'ablation doivent en effet être respectés : en premier lieu, la taille du prélèvement analysé doit être suffisante pour que l'analyse soit représentative de l'ensemble de l'échantillon. Ceci est particulièrement important pour les alliages contenant plus de 8,27 % de cuivre car leur structure est biphasée. En deuxième lieu, les micro-prélèvements doivent être invisibles à l'œil nu afin de satisfaire à la nécessité de non destructivité imposée par le type d'échantillon analysé. Il s'agit donc de déterminer la taille optimale correspondant au meilleur compromis entre ces deux paramètres.

Le premier critère indispensable pour que l'analyse de micro-prélèvements effectués par ablation laser sur des monnaies anciennes soit pertinente est la représentativité de la matière prélevée par rapport à l'échantillon dans son ensemble – ou plutôt par rapport à la fraction constituant l'alliage sain.

L'examen d'alliages modernes argent-cuivre biphasés, ainsi que l'expérience acquise au Centre Ernest Babelon plus généralement sur les matériaux anciens analysés par LA-ICP-MS, nous ont conduit à expérimenter des conditions d'analyses produisant des cratères d'ablation d'un diamètre de 80  $\mu\text{m}$  (Figure 18).



**Figure 18** - Image par microscopie électronique à balayage en mode électrons secondaires d'un cratère d'ablation sur un alliage moderne argent-cuivre.



**Figure 19** - Image par microscopie électronique à balayage en mode électrons retrodiffusés d'un cratère d'ablation sur l'alliage de référence EV4 après un léger polissage.

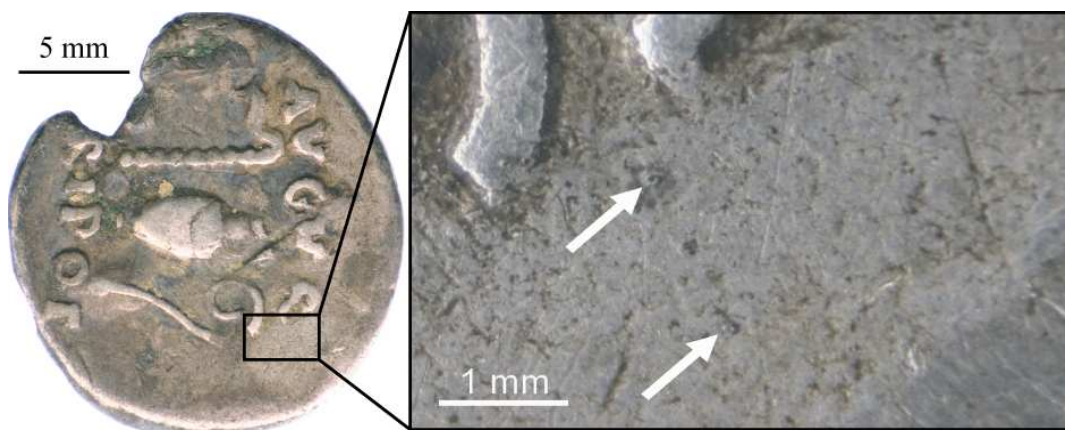
Les images obtenues par microscopie électronique confirment la représentativité d'un prélèvement d'un tel diamètre par rapport à l'échelle des phases constituant les alliages argent-cuivre. La Figure 19 présente à titre d'exemple un cratère d'ablation d'un diamètre approximatif de 80  $\mu\text{m}$  formé à la surface de l'alliage de référence EV4 (65,00 % Ag – 32,70 % Cu et 2 % de chacun des cinq éléments mineurs principaux). Cette image permet de constater qu'un diamètre de cratère d'ablation de 80  $\mu\text{m}$  est physiquement représentatif à l'échelle des phases formées pour un alliage argent-cuivre biphasé.

La pertinence d'un tel choix concernant la reproductibilité et la représentativité des micro-prélèvements pour la caractérisation des monnaies d'argent est discutée plus amplement dans la partie traitant de la validation du protocole analytique défini.

Le second critère pour que l'analyse par ICP-MS d'un micro-prélèvement effectué par ablation laser puisse s'appliquer à des objets précieux comme les monnaies d'argent est la non destructivité des échantillons. Une analyse portant sur un prélèvement microscopique sera tolérable si aucun dommage visible à l'œil nu n'est causé à l'échantillon.

La photographie de la surface d'une monnaie ancienne présentée en Figure 20 permet de constater que le diamètre des micro-prélèvements choisi convient pour que l'on puisse considérer l'analyse comme non destructive : les deux cratères formés à la surface de cet échantillon suite à l'analyse par LA-ICP-MS sont certes visibles sur la Figure 20 ; néanmoins, ces cratères peuvent être confondus avec des défauts présents à la surface des monnaies. Sans grossissement et sans indication de la localisation des micro-prélèvements, les cratères d'ablation sont totalement invisibles à l'œil nu après un léger brossage de la surface destiné à retirer le dépôt

de carbone formé autour des cratères. Un diamètre de micro-prélèvement de 80  $\mu\text{m}$  est donc un choix pertinent pour l'analyse des monnaies d'argent du point de vue de la non destructivité.



**Figure 20** - Photographies de la surface d'une monnaie ayant subi deux prélèvements par ablation laser.

#### *iv - Les paramètres d'ablation laser : la fréquence du laser*

La fréquence du laser et la durée de l'ablation sont également deux paramètres qui doivent être définis avec soin, afin de permettre l'obtention d'un signal suffisant durant l'ensemble de l'acquisition.

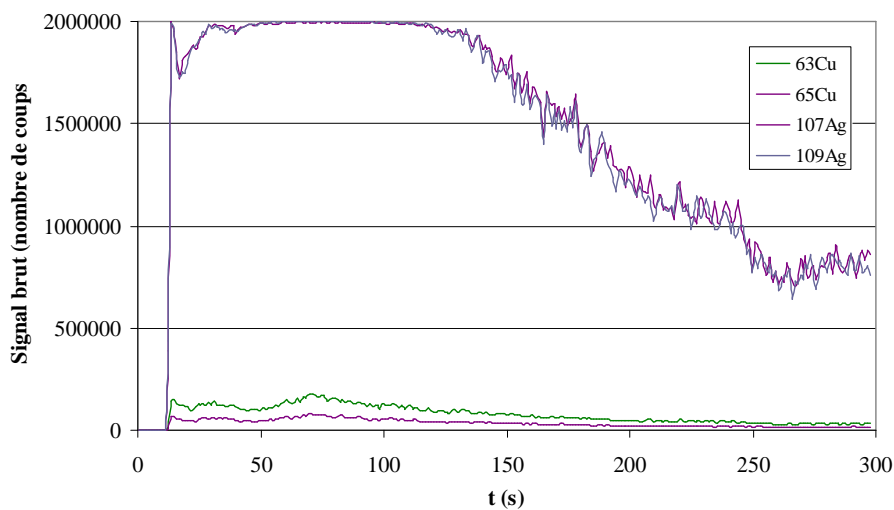
La fréquence du laser influence directement la vitesse de pénétration dans la matière, la quantité de matière prélevée par unité de temps et donc le nombre d'ions détectés instantanément. La durée de l'analyse est également conditionnée par la fréquence du laser.

Une fréquence trop rapide n'est pas convenable pour l'analyse des monnaies d'argent car l'une des finalités de l'analyse des éléments majeurs par LA-ICP-MS pour ces échantillons est de permettre la visualisation de l'enrichissement de surface, afin de s'en affranchir et d'en estimer l'importance. Une fréquence trop élevée risque, de plus, de gommer d'éventuelles hétérogénéités des alliages monétaires – hors enrichissement de surface – dont il convient de rendre compte sur les profils de concentration.

Une diminution de la fréquence du laser signifie en revanche que l'analyse devra être rallongée si l'on souhaite atteindre une profondeur équivalente ; ce facteur n'est certes pas d'importance égale avec ceux énoncés précédemment, néanmoins un allongement de la durée de chaque prélèvement peut avoir une incidence importante sur l'ensemble d'une séance d'analyse. Il est préférable de trouver un compromis permettant d'obtenir des signaux exploitables tout en minimisant, si cela est possible, la durée de chaque analyse.

Il convient donc de définir une fréquence permettant la visualisation d'éventuelles hétérogénéités de composition des alliages monétaires, et en premier lieu les phénomènes d'enrichissement de la surface en argent, ainsi que l'obtention d'une quantité de signal suffisante pour l'ensemble des éléments dosés en tant qu'éléments majeurs.

Le phénomène de saturation du détecteur doit également être pris en compte dans la définition des paramètres : les valeurs de signal brut supérieures à  $2 \cdot 10^6$  coups ne sont en effet pas détectées.



**Figure 21** - Signal acquis en temps réel sur l'alliage de référence RAgA1 à 5 Hz présentant une saturation du détecteur.

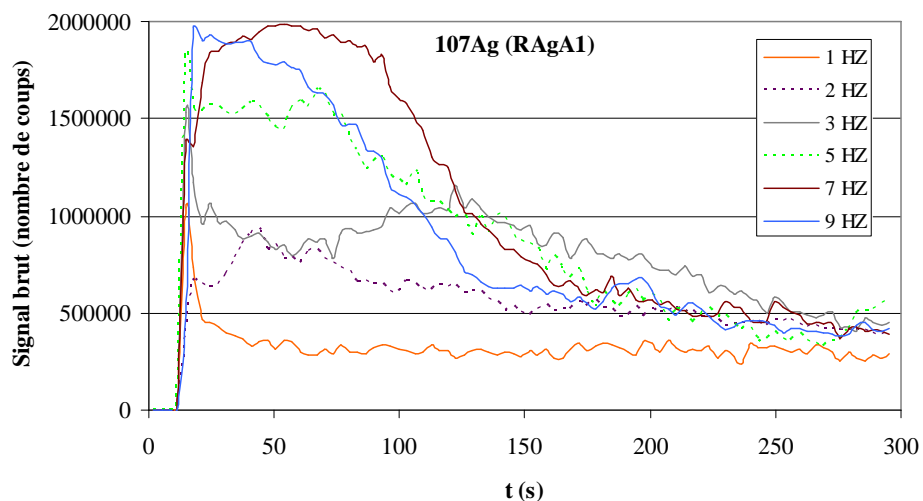
La saturation du détecteur est susceptible de se produire pour les isotopes  $^{107}\text{Ag}$  et  $^{109}\text{Ag}$  lors de l'analyse de monnaies particulièrement riches en argent. La Figure 21 présente à titre d'exemple le signal obtenu en temps réel sur l'alliage de référence RAgA1 contenant 96,94 % d'argent. On peut observer durant près de 100 s environ la saturation du détecteur pour les deux isotopes de l'argent : les valeurs obtenues pour les masses 107 et 109 plafonnent à  $2 \cdot 10^6$  coups lorsque le signal est trop important pour être détecté. Ce phénomène implique une sous-estimation du signal de l'argent, et donc de la teneur en argent qui sera calculée à partir de ces valeurs. En pratique, il est préférable de maintenir le signal à une valeur maximale comprise entre  $1,8 \cdot 10^6$  coups et  $1,9 \cdot 10^6$  coups. Cela signifie que les profils présentant un pic de début d'acquisition fortement prononcé, comme ceux observés pour les deux fréquences les plus rapides qui ont été étudiées (7 Hz et 9 Hz) doivent être évités.



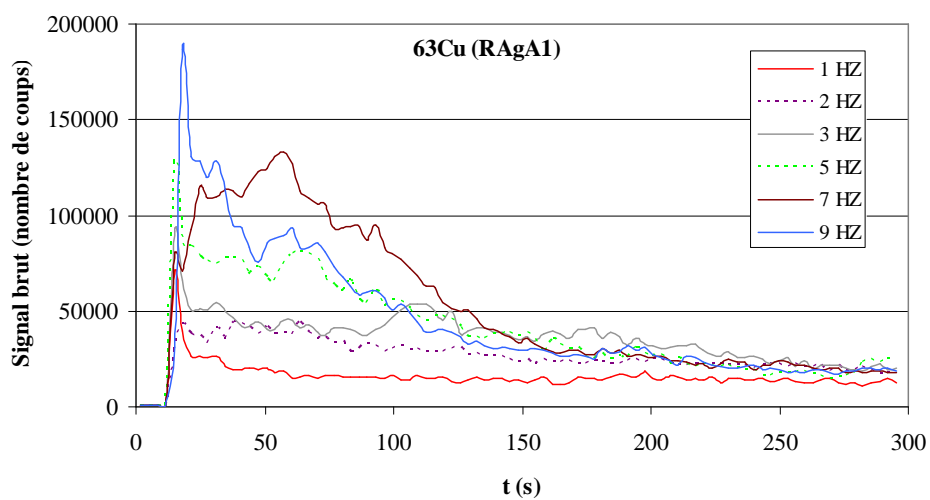
Afin de déterminer la fréquence d'ablation la plus adaptée pour l'analyse des éléments majeurs dans les monnaies d'argent, des mesures ont été effectuées à différentes fréquences sur les alliages de référence. L'analyse des éléments majeurs en profils de concentration par LA-ICP-MS passe par l'acquisition en temps réel des signaux des différents isotopes dosés. Les monnaies anciennes en argent présentent fréquemment une couche superficielle enrichie en argent dont il convient de s'affranchir pour analyser l'alliage situé sous cette couche n'ayant pas subi de modifications de composition. Il est important que les paramètres définis concernant l'ablation laser permettent de rendre compte de l'évolution des teneurs en éléments majeurs au fur et à mesure que le laser pénètre la couche de surface enrichie en argent. Il est toutefois plus important encore que ces paramètres soient déterminés afin d'offrir des conditions optimales pour le calcul des teneurs correspondant à l'alliage sain.

Le choix de la fréquence tel qu'il est décrit ci-dessous s'est fait dans cette optique : la fréquence qui sera utilisée dans notre protocole d'analyse des éléments majeurs par LA-ICP-MS doit permettre la mesure d'un maximum de signal sur une durée relativement longue, et non au début de l'ablation seulement.

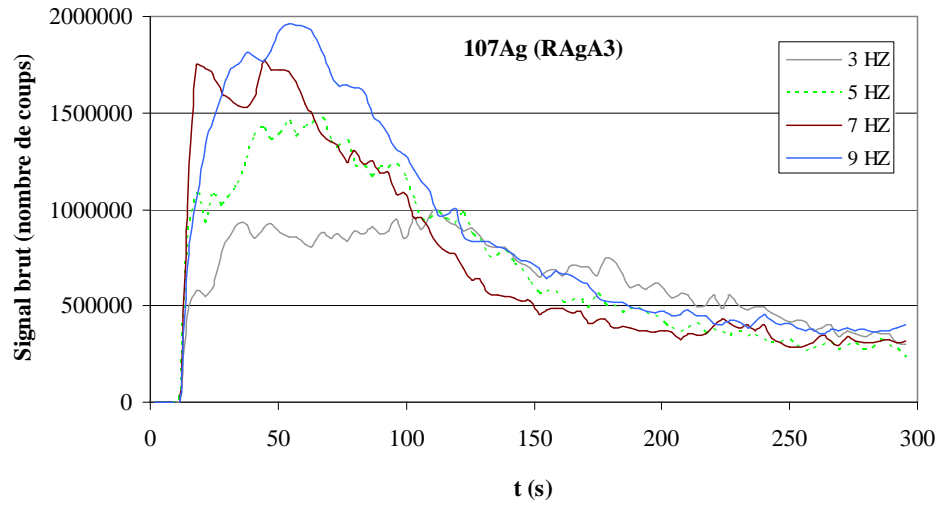
Pour chacun des alliages de référence RAgA1, RAgA3, RAgA4 et RAgA5 contenant de 60 % à 97 % d'argent environ, des mesures de signal ont été effectuées à différentes fréquences pendant une durée identique et dans les mêmes conditions opératoires. Les fréquences de tir du laser de 3 Hz, 5 Hz, 7 Hz et 9 Hz ont été étudiées. Les courbes d'évolution des signaux obtenus pour les deux isotopes  $^{63}\text{Cu}$  et  $^{107}\text{Ag}$  pour chaque fréquence étudiée ont été superposées sur un même graphique pour chacun des alliages de référence (Figures 22 à 29).



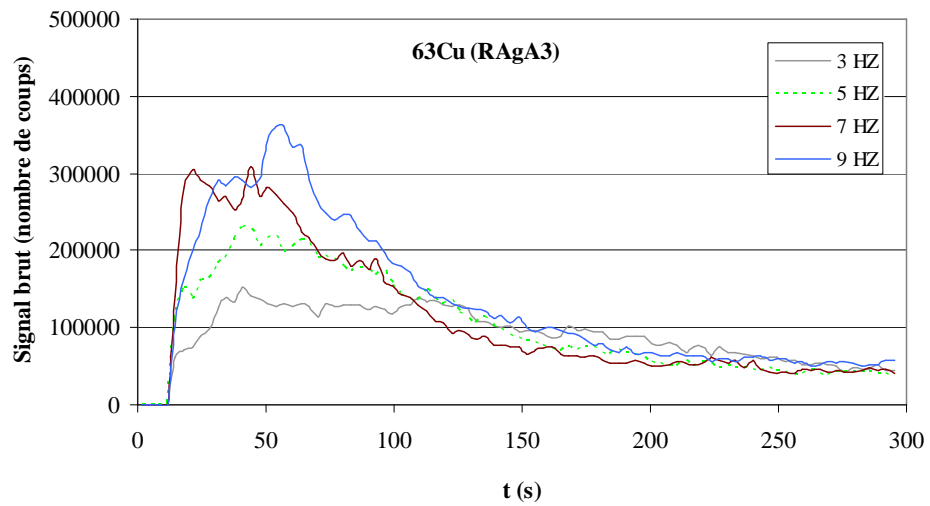
**Figure 22** - Evolution du signal mesuré au cours du temps pour l'isotope  $^{107}\text{Ag}$  sur l'alliage de référence RAgA1 pour des fréquences d'ablation comprises entre 1 et 9 Hz.



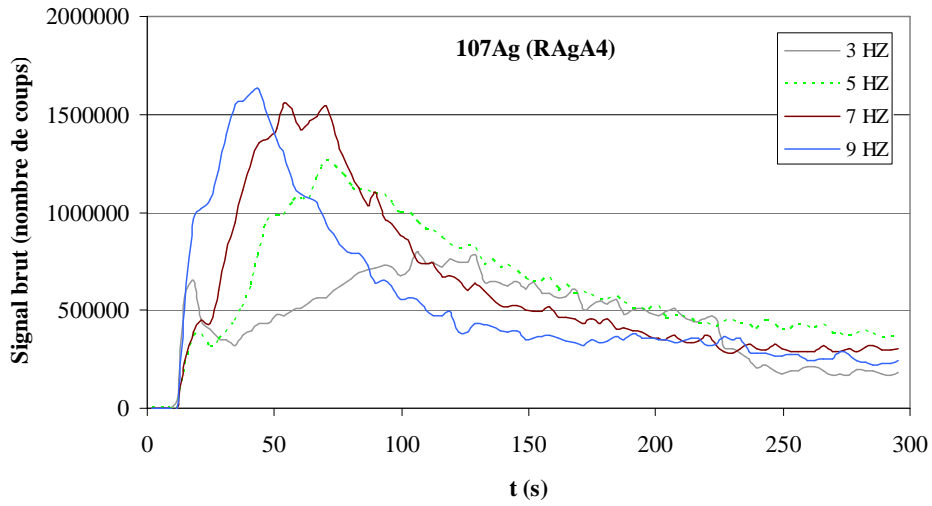
**Figure 23** - Evolution du signal mesuré au cours du temps pour l'isotope  $^{63}\text{Cu}$  sur l'alliage de référence RAgA1 pour des fréquences d'ablation comprises entre 1 et 9 Hz.



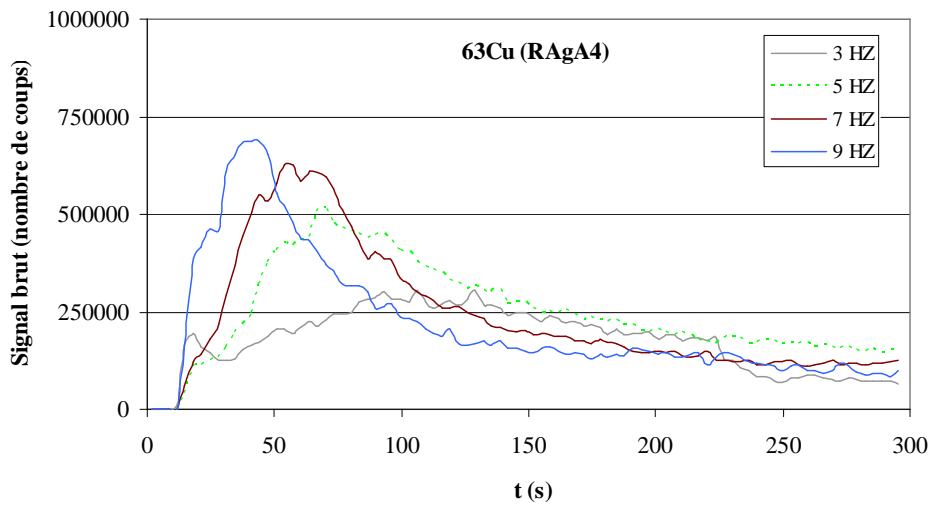
**Figure 24** - Evolution du signal mesuré au cours du temps pour l'isotope  $^{107}\text{Ag}$  sur l'alliage de référence RAgA3 pour des fréquences d'ablation comprises entre 3 et 9 Hz.



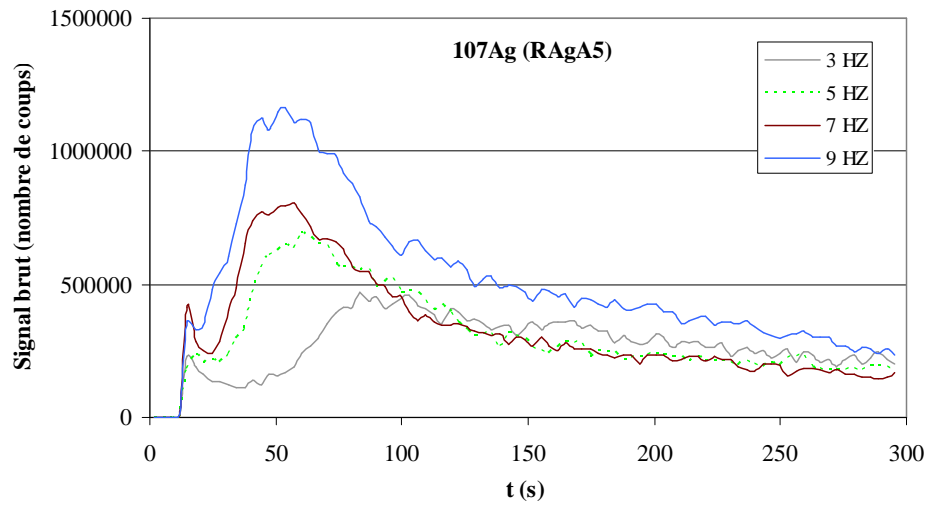
**Figure 25** - Evolution du signal mesuré au cours du temps pour l'isotope  $^{63}\text{Cu}$  sur l'alliage de référence RAgA3 pour des fréquences d'ablation comprises entre 3 et 9 Hz.



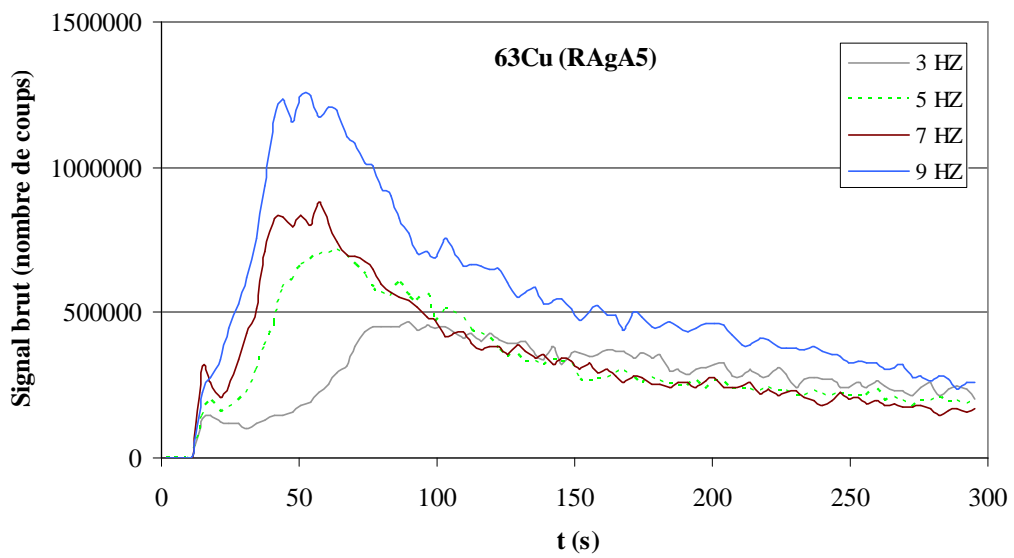
**Figure 26** - Evolution du signal mesuré au cours du temps pour l'isotope  $^{107}\text{Ag}$  sur l'alliage de référence RAgA4 pour des fréquences d'ablation comprises entre 3 et 9 Hz.



**Figure 27** - Evolution du signal mesuré au cours du temps pour l'isotope  $^{63}\text{Cu}$  sur l'alliage de référence RAgA4 pour des fréquences d'ablation comprises entre 3 et 9 Hz.



**Figure 28** - Evolution du signal mesuré au cours du temps pour l'isotope  $^{107}\text{Ag}$  sur l'alliage de référence RAgA5 pour des fréquences d'ablation comprises entre 3 et 9 Hz.



**Figure 29** - Evolution du signal mesuré au cours du temps pour l'isotope  $^{63}\text{Cu}$  sur l'alliage de référence RAgA5 pour des fréquences d'ablation comprises entre 3 et 9 Hz.

Les Figures 22 et 23 mettent en évidence qu'une fréquence relativement faible de 3 Hz est la plus adaptée pour un alliage contenant relativement peu de cuivre, comme RAgA1. C'est en effet à cette fréquence que l'on observe un amortissement du signal de l'argent et du cuivre le moins prononcé après le maximum atteint en début d'acquisition.

L'intérêt d'employer une fréquence faible est moins évident au regard des Figures 24 et 25 correspondant à l'alliage RAgA3 (91,50 % Ag - 8,47 % Cu) : les différences de signaux bruts observées sur ces deux figures pour les quatre fréquences étudiées sont peu marquées au-delà de 100 s.

Une fréquence de 5 Hz permet d'obtenir un signal légèrement supérieur à celui détecté pour les autres valeurs étudiées pour l'alliage de référence RAgA4 contenant 79,94 % d'argent et 20,03 % de cuivre (Figures 26 et 27).

En revanche, c'est à 9 Hz que le signal brut obtenu est le plus important tout au long de l'ablation pour l'alliage RAgA5 (59,89 % Ag - 40,10 % Cu, Figures 28 et 29).

Les alliages de référence EV1 et EV2 (respectivement 75 % Ag-15 % Cu et 45 % Ag - 45 % Cu, auxquels s'ajoutent pour tous deux 2 % de zinc, d'étain, d'or, de plomb et de bismuth) ont également fait l'objet d'essais similaires. Les observations qui ressortent de l'examen des courbes obtenues sont les mêmes que celles énoncées pour RAgA5 : pour l'argent comme pour le cuivre, le signal le plus élevé, du début à la fin de chaque expérience, est obtenu pour une fréquence de 9 Hz. De même, les cinq éléments mineurs principaux contenus dans les alliages EV1 et EV2 présentent des valeurs de signal plus élevées tout au long des 300 s d'ablation pour une fréquence de 9 Hz. Les courbes correspondant aux autres fréquences étudiées se confondent environ 150 s après le début de l'acquisition.

L'ensemble de ces essais montre que la fréquence qui permet d'obtenir un signal maximum tout au long de l'acquisition dépend de la composition des alliages. Une fréquence relativement faible de l'ordre de 3 Hz semble être préférable pour les alliages très purs en argent, tandis qu'une fréquence élevée de 9 Hz est plus adaptée pour les alliages contenant davantage de cuivre. Cela pourrait signifier que la fréquence devra être adaptée au cas par cas à la composition supposée des monnaies anciennes analysées. Deux raisons principales s'opposent à une telle approche : en premier lieu, il est fréquent que les monnaies analysées soient de composition inconnue et, dans de tels cas, ce mode opératoire ne peut pas être employé. En deuxième lieu, les contraintes liées à la vitesse de pénétration du

laser dans l'alliage, la nécessité d'un signal suffisant tout en évitant la saturation, imposent le choix d'une fréquence intermédiaire.

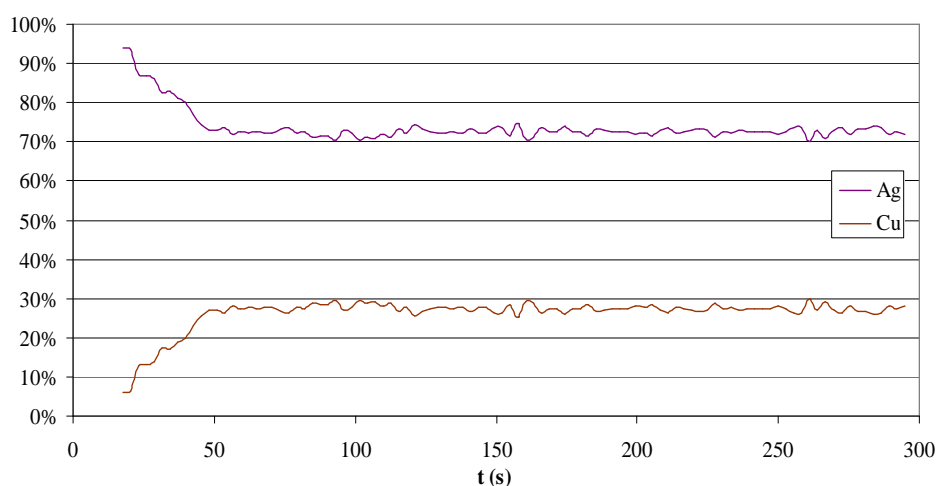
Si l'on reprend individuellement chacune des figures présentées, une fréquence de 5 Hz semble être le choix le plus judicieux : pour les alliages très purs en argent comme pour ceux contenant davantage de cuivre, le signal obtenu reste relativement élevé pendant les 300 s qu'ont duré les expérimentations relatives au choix de la fréquence.

C'est donc une fréquence de 5 Hz qu'il a été décidé d'employer de manière systématique pour l'analyse des éléments majeurs en profils de concentration. Nous verrons dans le paragraphe suivant quelle est la durée nécessaire pour s'affranchir d'une couche d'enrichissement de surface à une telle fréquence, et ainsi permettre l'analyse de l'alliage sain.

#### *v - Les paramètres d'ablation laser : la durée de l'ablation*

Le choix de la durée de l'ablation laser est gouverné par la fréquence définie dans le paragraphe précédent ; il convient dans celui-ci de déterminer quelle durée, à une fréquence de 5 Hz, permet d'obtenir des profils présentant un palier de stabilité suffisamment long pour calculer les concentrations en éléments majeurs.

Les essais visant à la définition de ce paramètre ont été réalisées sur des monnaies anciennes, pour l'essentiel des deniers carolingiens. Il s'est avéré qu'une durée de 300 s est la plus appropriée pour ce type d'échantillons, comme pour des alliages monétaires de composition inconnue. Une telle durée, combinée à une fréquence d'ablation de 5 Hz, permet de visualiser sur les profils les deux parties correspondant à l'enrichissement de surface et à l'alliage sain (Figure 30).



**Figure 30** - Profils de concentration de l'argent et du cuivre obtenus suite à l'acquisition d'une ablation de 300 s à 5 Hz sur la monnaie carolingienne Prou 920.

On observe sur ces courbes présentées à titre d'exemple dans un premier temps la décroissance progressive de la teneur en argent, depuis une valeur proche de 95 % en proche surface jusqu'à environ 72 %, sur une durée de 60 s environ. La courbe correspondant au cuivre, dont la teneur en surface est inférieure à celle de l'intérieur, croit de manière symétrique sur cette même durée. Sur la deuxième partie de la courbe, les teneurs en argent et en cuivre calculées se stabilisent jusqu'à la fin de l'acquisition : il s'agit de l'analyse de l'alliage sain.

Nous verrons plus loin dans la partie traitant de la validation du protocole analytique si la durée définie ici est effectivement suffisante pour atteindre un palier de stabilité suffisamment long pour des monnaies de titre relativement faible et si, pour certains *corpus* monétaires de titre excellent, cette durée peut être réduite de manière systématique.

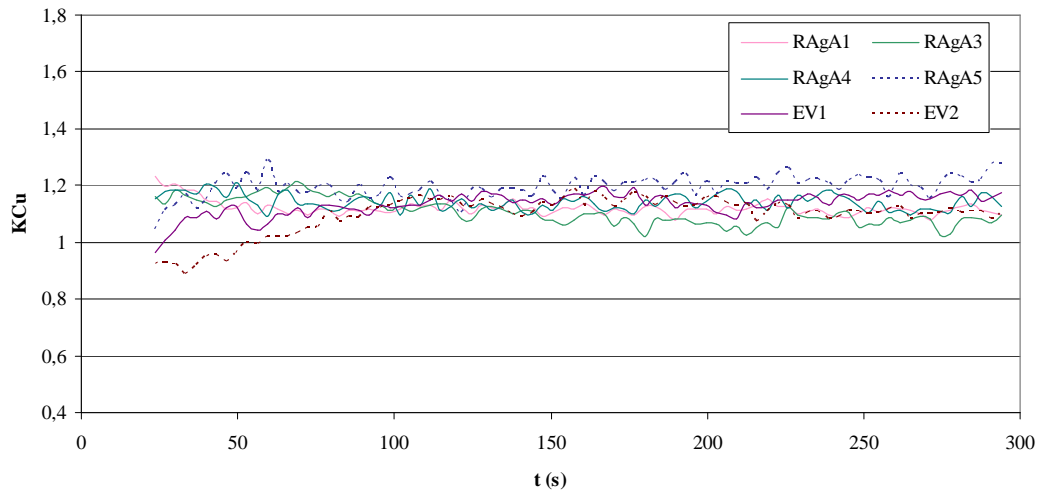
Les conditions opératoires définies doivent permettre d'obtenir des rapports de signaux constants entre les différents éléments dosés, en particulier lorsque le signal décroît à la fin des 300 s d'ablation. Afin de pouvoir comparer entre elles les courbes d'évolution des rapports de signal entre l'argent et les autres constituants dosés dans le menu d'analyse des éléments majeurs, ce sont les coefficients de réponse ( $K_X = (S_X/S_{107Ag})/([X][Ag])$ ) de chacun de ces éléments qui ont été étudiés pour les alliages de référence.

Les courbes obtenues pour le cuivre en procédant de cette manière apparaissent sur la Figure 31. Pour les alliages contenant très peu de cuivre comme pour ceux qui présentent des teneurs élevées pour cet élément, le coefficient de réponse du cuivre est linéaire tout au long des 300 s d'ablation. La normalisation du signal du cuivre à celui de l'argent pour le calcul des concentrations peut s'appliquer à des alliages contenant des quantités de cuivre et d'argent très variables : les valeurs des coefficients de réponse sont en effet sensiblement identiques pour des alliages contenant de 3 % à 45 % de cet élément. Les coefficients de réponse sont donc indépendants de la composition de l'alliage. De plus, l'amplitude des variations de ce coefficient ne semble pas augmenter de manière significative lorsque le signal décroît à la fin de l'ablation. Il n'y a donc pas de fractionnement isotopique entre l'argent et le cuivre en suivant les conditions expérimentales définies.

Les courbes d'évolution des coefficients de réponse correspondant aux alliages EV1 et EV2 montrent une légère augmentation durant les premières secondes de l'analyse, avant de se stabiliser à une valeur proche de celle obtenue pour les autres alliages de référence. Cela signifie que la teneur en cuivre à la



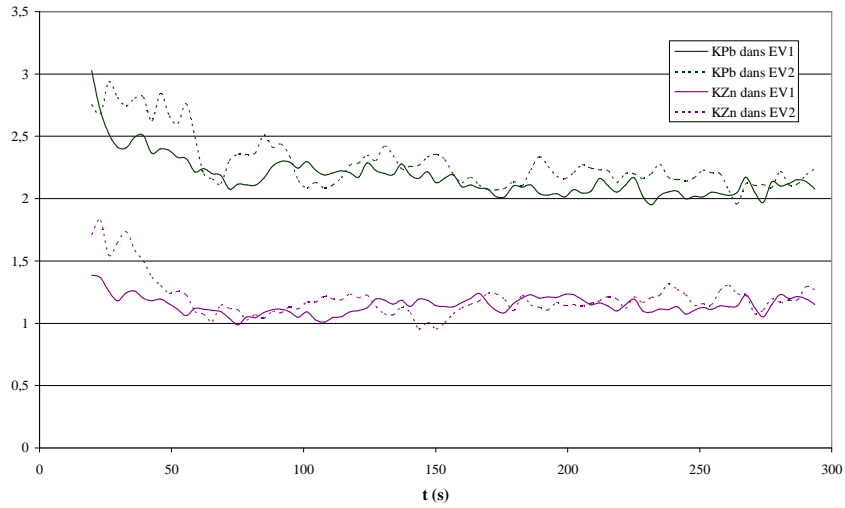
proche surface de ces alliages est légèrement inférieure à la valeur attendue. Ce phénomène pourrait être dû à un léger enrichissement en argent de la surface de ces alliages durant leur refroidissement.



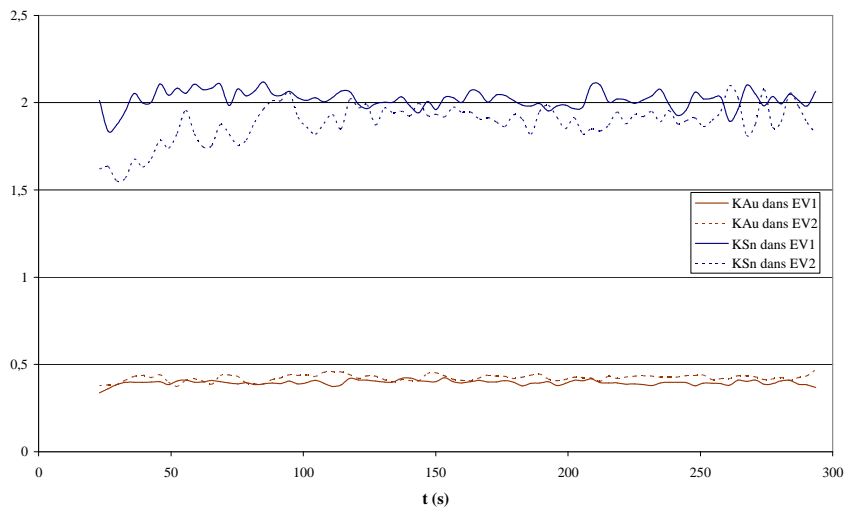
**Figure 31** - Courbes d'évolution du coefficient de réponse du cuivre  $K_{Cu}$  au cours d'une acquisition de 300 s à 5 Hz sur les alliages de référence utilisés pour le dosage des éléments majeurs.

L'évolution des coefficients de réponse des cinq éléments mineurs principaux dosés en profils de concentration (zinc, étain, or, plomb et bismuth) a également été étudiée. Les coefficients de réponse  $K$  ont été calculés pour ces éléments lors d'une ablation de 300 s à 5 Hz sur les deux alliages de référence EV1 et EV2 contenant chacun 2 % de chacun d'entre eux, et respectivement 75 % et 45 % d'argent.

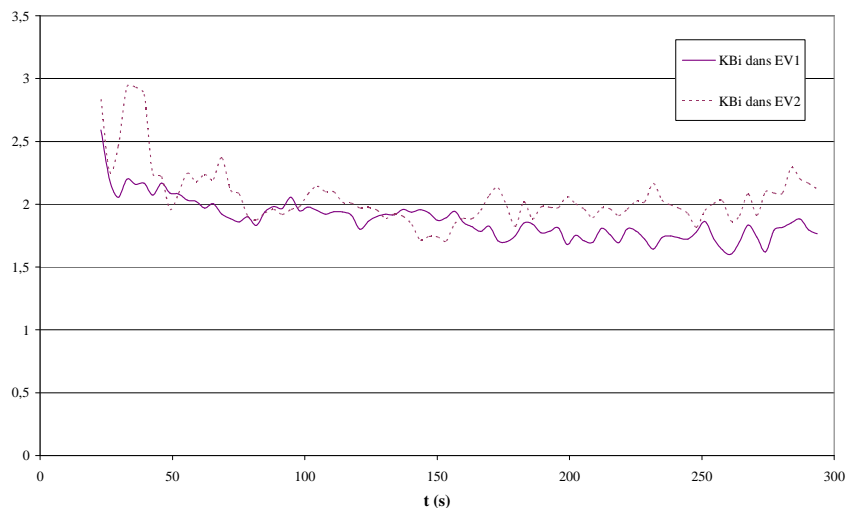
Les courbes d'évolution des coefficients de réponse des cinq éléments mineurs principaux sont présentées sur les Figures 32, 33 et 34. L'examen de ces courbes montre que le fractionnement isotopique ne semble pas augmenter de manière significative durant l'ablation laser. La combinaison d'une ablation de 300 s à une fréquence de 5 Hz semble donc également adaptée pour le dosage de ces éléments en profils de concentration.



**Figure 32** - Courbes d'évolution des coefficients de réponse du zinc et du plomb au cours d'une acquisition de 300 s à 5 Hz sur les alliages de référence EV1 et EV2.



**Figure 33** - Courbes d'évolution des coefficients de réponse de l'or et de l'étain au cours d'une acquisition de 300 s à 5 Hz sur les alliages de référence EV1 et EV2.



**Figure 34** - Courbes d'évolution des coefficients de réponse du bismuth au cours d'une acquisition de 300 s à 5 Hz sur les alliages de référence EV1 et EV2.

Pour le cuivre comme pour chacun des cinq éléments mineurs principaux étudiés, aucun fractionnement n'apparaît de manière significative par rapport à l'argent. La combinaison d'une fréquence d'ablation laser de 5 Hz à une durée d'acquisition de 300 s semble donc offrir des conditions favorables pour l'analyse des éléments majeurs et mineurs principaux dans les monnaies d'argent en profils de concentration.

Les courbes d'évolution des coefficients de réponse du zinc, du plomb, de l'étain et du bismuth et, dans une moindre mesure, de l'or, montrent une variation durant quelques dizaines de secondes au début de l'ablation. Il est peu vraisemblable qu'il s'agisse d'un phénomène lié au fractionnement isotopique de ces éléments par rapport à l'argent : les variations observées se produisent en début d'ablation, et non à la fin de l'acquisition. Il est plus probable qu'il s'agisse d'un phénomène d'enrichissement ou d'appauvrissement de ces éléments à la surface des alliages lors de leur refroidissement. Quelques dizaines de secondes au maximum sont concernées, le dosage des éléments concernés effectué à partir de l'ensemble des profils ne sera donc pas affecté de manière significative.

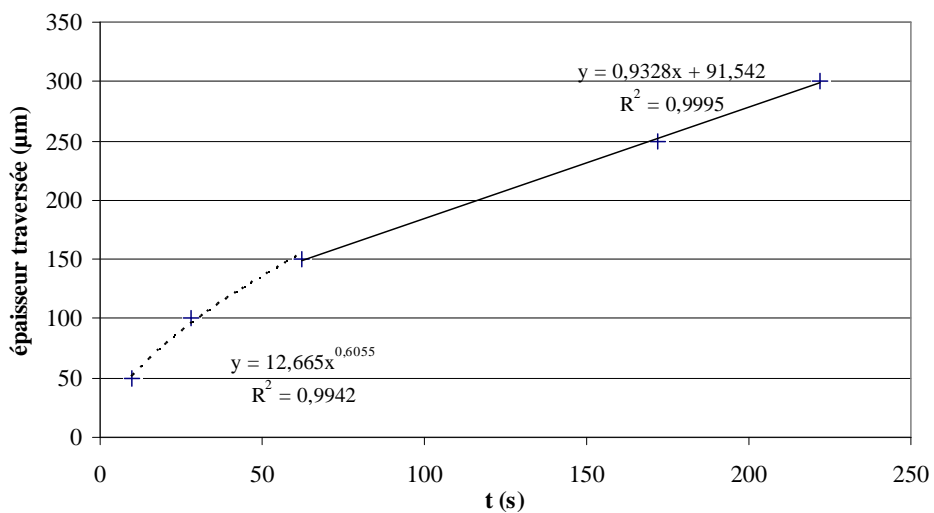
#### *vi - La profondeur analysée*

Les résultats des expérimentations présentées dans les paragraphes précédents ont permis de définir les paramètres relatifs à l'ablation laser des monnaies : les micro-prélèvements effectués sur les pièces d'argent durent 300 s à

une fréquence de 5 Hz. Ces paramètres semblent adaptés à l'analyse des objets d'argent au vu des profils obtenus lors des expériences visant à les définir spécifiquement. Une estimation de la profondeur atteinte dans de telles conditions est toutefois nécessaire.

Des essais ont été réalisées sur des feuilles d'alliage eutectique argent-cuivre moderne afin d'estimer la profondeur atteinte en fonction de la durée d'ablation. Ces feuilles ou empilement de feuilles, d'épaisseurs comprises entre 50 et 300  $\mu\text{m}$ , ont été soumises à une ablation laser dans les mêmes conditions que celles définies pour l'analyse des éléments majeurs dans les monnaies d'argent.

La représentation du signal obtenu pour l'argent en fonction du temps permet d'observer une chute soudaine des valeurs de signal mesurées : il s'agit de l'instant correspondant à la traversée de l'alliage. Il est ainsi possible de représenter la profondeur atteinte par le laser en fonction de la durée de l'ablation (Figure 35).



**Figure 35** - Essai de modélisation de la profondeur atteinte en fonction de la durée d'ablation à une fréquence de 5 Hz pour un alliage eutectique argent-cuivre moderne.

La courbe obtenue peut se décomposer en deux parties distinctes : dans un premier temps, la progression du laser est relativement rapide, puis s'amortit légèrement. La pénétration du laser dans la matière au début de l'ablation n'est pas linéaire. Dans un deuxième temps, au-delà de 60 s environ dans les conditions de ces essais, la progression du laser dans l'alliage semble linéaire. La défocalisation progressive du laser aurait pu laisser croire que la vitesse à laquelle celui-ci pénètre dans la matière décroît à mesure que la profondeur atteinte augmente ; c'est le cas durant les soixante premières secondes de l'ablation, au cours desquelles la profondeur atteinte est de l'ordre de 150  $\mu\text{m}$ . Par la suite, les essais réalisées

semblent montrer que la profondeur atteinte progresse linéairement avec la durée de l'ablation.

La corrélation linéaire entre la profondeur atteinte par un laser Nd :YAG à 266 nm et la durée de l'ablation avait été mise en évidence par les expériences conduites par Mank et Mason sur du verre pendant des durées comprises entre 5 et 40 minutes (Mank et Mason, 1999).

Si l'on applique l'équation de la droite de régression établie à partir de nos valeurs expérimentales, la profondeur atteinte dans un alliage argent-cuivre moderne de composition eutectique après une ablation de 300 s à une fréquence de 5 Hz serait d'environ 370  $\mu\text{m}$ .

Cette valeur ne peut être transposée directement aux monnaies anciennes à base d'argent : seule la composition de l'alliage eutectique a été étudiée ici, et non l'ensemble de la gamme des teneurs en argent qui peuvent exister dans les monnaies. Or, la vitesse d'ablation dépend des propriétés du matériau, et donc dans notre cas des teneurs en argent et en cuivre. Les hétérogénéités de composition entre la surface et l'intérieur modifient également la vitesse de progression du laser dans la couche d'enrichissement de surface. Le caractère poreux de cette couche superficielle influence vraisemblablement la pénétration du laser dans l'alliage, en comparaison avec ce qui a été observé pour un alliage eutectique moderne, cohérent et exempt de cavités. La valeur calculée de 370  $\mu\text{m}$  constitue donc un ordre de grandeur, qui permet d'avancer que les paramètres de 300 s d'ablation à une fréquence de 5 Hz sont probablement suffisants pour atteindre une profondeur au moins égale à 350  $\mu\text{m}$ . En conséquence, l'alliage sain pourra être atteint et analysé sur une épaisseur d'environ 150  $\mu\text{m}$  pour des monnaies anciennes présentant des couches de surface perturbées de l'ordre de 200  $\mu\text{m}$ .

Selon Mason et Mank, la vitesse de pénétration du laser dans la matière varie de à 0,2  $\mu\text{m}$  par impact pour de l'oxyde d'aluminium  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , à 2  $\mu\text{m}$  pour un matériau polymère (Mason et Mank, 2001). Les alliages argent-cuivre n'ont pas été étudiés spécifiquement par ces auteurs, la valeur correspondant à ce type de matériau n'apparaît donc pas dans leur publication. On peut néanmoins imaginer que celle-ci est plutôt de l'ordre de la valeur mesurée la plus basse, à savoir 0,2  $\mu\text{m}$  par impact, soit une pénétration de 300  $\mu\text{m}$  après une ablation de 300 s à 5 Hz. Il s'agit cette fois encore seulement d'un ordre de grandeur, qui semble toutefois confirmer la valeur extrapolée de notre courbe expérimentale.

Les recherches de Mank et Mason ont de plus mis en évidence un lien entre le fractionnement isotopique et le rapport entre le diamètre du cratère d'ablation et

sa profondeur (Mank et Mason, 1999 et Mason et Mank, 2001). Il est donc important de pouvoir estimer la profondeur atteinte par le laser dans nos conditions d'analyse afin de s'assurer que les paramètres opératoires définis sont peu propices au fractionnement isotopique. Selon Mank et Mason, le fractionnement isotopique demeure acceptable si le ratio profondeur/diamètre est inférieur à quatre (Mason et Mank, 2001). Dans nos conditions d'analyse des éléments majeurs dans les monnaies d'argent, le diamètre des cratères d'ablation est de 80  $\mu\text{m}$ , et la profondeur atteinte a été estimée à 350  $\mu\text{m}$  environ. Le ratio entre ces valeurs est de 4,4. Les conditions définies sont donc proches de celles pour lesquelles le fractionnement n'est pas significatif selon Mank et Mason.

#### *vii - Le calcul des concentrations*

Le mode *TRA* utilisé pour l'acquisition du signal lors de l'analyse des éléments majeurs fournit une valeur de signal pour chaque isotope détecté et pour chaque intervalle de temps. Le calcul des concentrations se fait suivant la procédure décrite précédemment (voir *supra* p. 59). Certaines spécificités liées au type de signal obtenu doivent néanmoins être décrites pour que notre démarche analytique soit comprise dans son intégralité.

##### (i) - La mesure du bruit de fond

La première étape consiste en la soustraction du bruit de fond (« gas blank ») de chaque valeur de signal instantanée détectée.

Le laser est mis en marche 10 s après le début de l'acquisition : le signal obtenu durant ces dix premières secondes est d'abord moyenné, puis soustrait à chaque valeur de signal instantané obtenue par la suite.

Certaines publications antérieures d'analyses par LA-ICP-MS préconisent d'effectuer une mesure du bruit de fond d'une durée identique à celle de l'acquisition ; cela signifie que la durée totale de la séance d'analyse serait doublée en suivant une telle approche. Des essais ont démontré qu'une durée de 10 s fournit des valeurs de bruit de fond équivalentes à celles obtenues au cours de 300 s d'acquisition sans ablation laser. Il a donc été décidé d'utiliser les dix premières secondes de la durée totale d'une acquisition pour la mesure de ce bruit de fond.

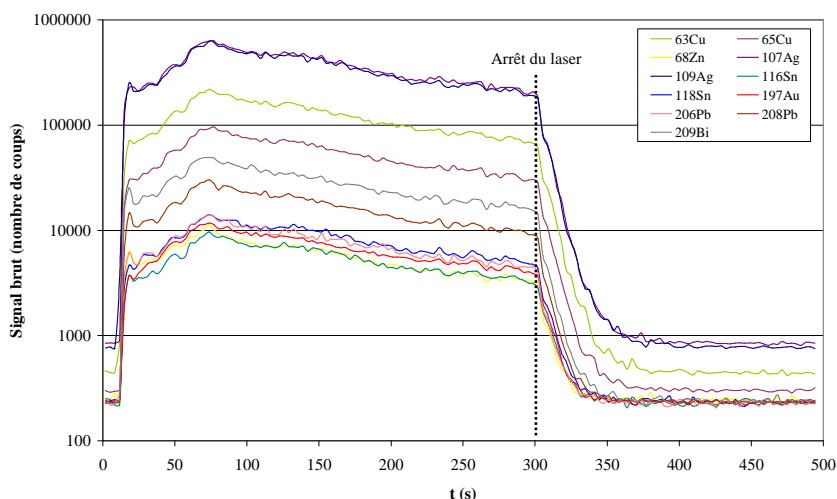
##### (ii) - La durée de purge de la cellule

Le volume important de la cellule d'ablation utilisée pour l'analyse des monnaies d'argent impose le respect d'un délai entre deux analyses, afin que la

matière prélevée pendant l'ablation d'un micro-prélèvement n'interfère pas avec le signal de la suivante.

Des expériences ont été effectuées spécifiquement dans cette optique : certains des alliages de référence, ainsi que des monnaies anciennes, ont été soumis à des ablations de 300 s à 5 Hz comme le prévoit le protocole d'analyse défini. Le signal a été acquis durant 500 s afin d'observer sa décroissance après l'arrêt de l'ablation laser.

La Figure 36 présente à titre d'exemple les courbes de signal brut obtenues en suivant cette méthodologie pour chacun des isotopes détectés dans le menu d'analyse des éléments majeurs. La chute de signal observée suite à l'arrêt de l'ablation laser après 300 s d'acquisition dure 80 s environ. En conséquence, une durée minimale de lavage de la cellule par le gaz vecteur de 120 s a été choisie par sécurité afin de s'assurer que la matière prélevée antérieurement est totalement évacuée. La mesure du bruit de fond pour l'analyse suivante sera ainsi exempte de tout signal résiduel parasite.



**Figure 36** - Evolution du signal brut mesuré pour l'ensemble des isotopes détectés dans le menu d'analyse des éléments majeurs durant 300 s d'ablation et 200 s après l'arrêt du laser. Echelle logarithmique en ordonnée.

### (iii) - La procédure de calcul

Les valeurs de signal obtenues pour chaque isotope sont soumises à la procédure de calcul après déduction du bruit de fond. L'étalon interne choisi pour la normalisation des signaux des autres isotopes est  $^{107}\text{Ag}$  : cet isotope – ou l'autre isotope naturel de l'argent  $^{109}\text{Ag}$ , qui aurait pu également être choisi du fait de la proximité de leurs abondances naturelles respectives –, est peu sujet au fractionnement isotopique et suffisamment abondant pour remplir ce rôle.

Le mode d'acquisition en temps réel impose d'effectuer ce calcul pour chacune des valeurs obtenues. On obtient ainsi la teneur de chaque élément pour chaque intervalle de temps. L'ensemble des valeurs représentées en fonction de la durée de l'ablation forme le profil de concentration.

Trois ablations sont effectuées en différents endroits sur chaque monnaie afin de s'assurer de la reproductibilité et donc de la représentativité des micro-prélèvements. Pour chacun des trois profils, une moyenne des teneurs instantanées de chaque élément est calculée sur la zone formant un palier de stabilité correspondant à l'alliage sain.

La moyenne des trois valeurs obtenues est ensuite calculée. Les teneurs déterminées ainsi pour l'argent et le cuivre sont systématiquement conservées pour le calcul de la composition finale de la monnaie. Pour les cinq éléments mineurs principaux (Zn, Sn, Au, Pb et Bi), la teneur déterminée dans ce menu d'analyse peut être conservée si elle est suffisamment importante, ou éliminée au profit de celle obtenue dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces. Les conditions de choix de l'une ou l'autre des deux valeurs dépendent des limites de détection de chacun des éléments mineurs principaux dosés dans le menu d'analyse des éléments majeurs.

*viii - Les limites de détection des cinq éléments mineurs principaux dans le menu d'analyse des éléments majeurs*

Les limites de détection des cinq éléments mineurs dosés dans le menu d'analyse des éléments majeurs ont été déterminées à partir de valeurs de signal correspondant à trois fois l'écart-type calculé sur le bruit de fond obtenu lors de 40 mesures.

Le bruit de fond a été mesuré durant les dix premières secondes d'acquisition pour lesquelles l'ablation laser n'a pas encore commencé. Ce bruit de fond est très faible et très reproductible pour l'ensemble des isotopes des cinq éléments mineurs principaux : en moyenne, le bruit de fond mesuré dans ces conditions est de l'ordre de 250 coups, et l'écart-type calculé sur les 40 valeurs prises en compte est compris entre 8 et 12 selon les éléments. Les valeurs des limites de détection obtenues de cette manière apparaissent dans le Tableau 1.

Zinc	Etain	Or	Plomb	Bismuth
600	90	80	60	40

**Tableau 1** - Limites de détection en ppm des cinq éléments mineurs principaux dans le menu d'analyse des éléments majeurs à partir d'un signal égal à trois fois l'écart-type calculé à partir du bruit de fond.



Zinc	Etain	Or	Plomb	Bismuth
1200	450	500	300	100

**Tableau 2** - Limites de détection en ppm des cinq éléments mineurs principaux dans le menu d'analyse des éléments majeurs calculées à partir d'un signal égal au bruit de fond.

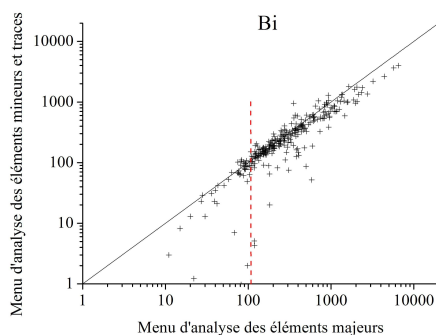
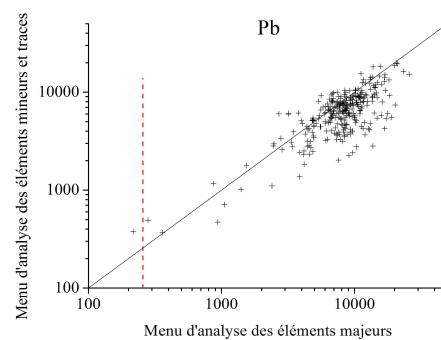
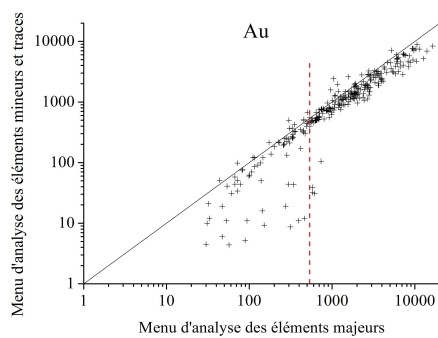
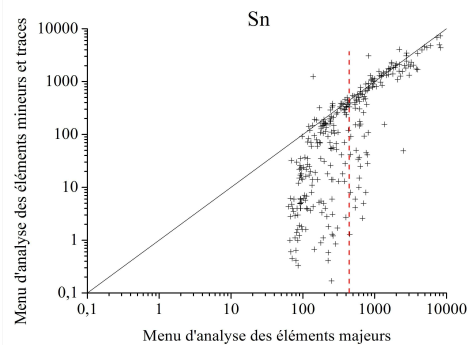
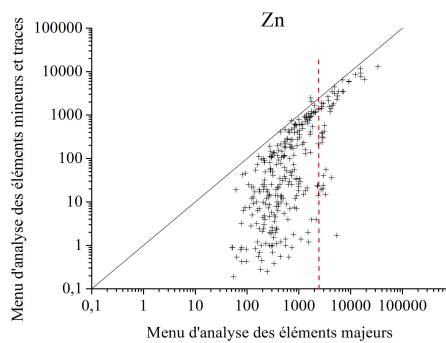
L'expérience acquise lors des analyses en profils de concentration des cinq éléments mineurs principaux montre cependant que les limites de détection présentées dans le Tableau 1 sont particulièrement optimistes.

En conséquence, d'autres valeurs de limites de détection ont été calculées à partir des 40 valeurs de bruit de fond utilisées précédemment. Le signal minimum détectable a cette fois été considéré égal au bruit de fond moyen, soit 250 coups environ au lieu des 30 coups environ correspondant à trois fois l'écart-type calculé sur les valeurs de bruit de fond prises en compte. Les limites de détection obtenues ainsi apparaissent dans le Tableau 2. Ces valeurs semblent en meilleur accord avec la comparaison entre les résultats obtenus selon les deux menus d'analyse. C'est donc à partir des teneurs présentées dans ce tableau que les valeurs obtenues dans le menu d'analyse des éléments majeurs sont conservées pour le calcul définitif de la composition des monnaies.

Les Figures 37a à 37e présentent la comparaison entre les teneurs des cinq éléments mineurs principaux déterminées sur de mêmes monnaies dans les menus d'analyse des éléments majeurs d'une part et des éléments mineurs et traces. La ligne pointillée rouge verticale qui apparaît sur chacun de ces graphiques représente la limite de détection de l'élément dans le menu d'analyse des éléments majeurs.

Les teneurs des cinq éléments mineurs principaux sont systématiquement calculées à partir des valeurs de signal détecté lors de l'analyse des éléments majeurs. En revanche, il peut arriver que les teneurs de ces éléments ne puissent pas être calculées dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces : le détecteur sature lorsque ces teneurs sont particulièrement élevées, entraînant une absence de valeur de signal, et donc l'impossibilité de calculer une concentration. Dans de tels cas, la seule valeur qui peut être utilisée est celle obtenue lors de l'analyse des éléments majeurs en profils de concentration.

La comparaison entre les teneurs calculées à partir des deux menus d'analyse n'est donc pas possible ; les points correspondant aux teneurs très élevées des cinq éléments mineurs principaux n'apparaissent donc pas sur les Figures 37a à 37e.



**Figures 37a à 37e** - Comparaison des teneurs des cinq éléments mineurs principaux déterminées dans le menu d'analyse des éléments majeurs et dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces. Echelle logarithmique en abscisse et en ordonnée. Toutes les teneurs sont exprimées en ppm. Les lignes verticales rouges matérialisent la limite de détection de l'élément dans le menu d'analyse des éléments majeurs.

La Figure 37a montre que la limite de détection calculée pour le zinc dans le menu d'analyse des éléments majeurs est adaptée pour le choix entre les valeurs déterminées dans les deux menus d'analyse. On observe que les deux valeurs sont cohérentes pour la majorité des échantillons dont la teneur en zinc est de l'ordre de la limite de détection du menu d'analyse des éléments majeurs (1200 ppm). Pour les teneurs inférieures, des différences de plusieurs ordres de grandeurs peuvent apparaître. La valeur obtenue pour le zinc dans le menu d'analyse des éléments

majeurs est dans ces cas très supérieure à celle de l'autre menu d'analyse. C'est cette dernière qui doit être privilégiée, eu égard aux limites de détection nettement plus basses en mode Pulse Counting en accumulant le signal sur une durée fixée. Les teneurs en zinc supérieures à 1000 ppm sont relativement peu nombreuses dans les monnaies analysées pour cette étude, c'est donc la teneur déterminée dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces qui a été privilégiée le plus souvent.

Les observations qui peuvent être faites pour le zinc sont également valables pour l'étain : au-delà de la limite de détection calculée à partir d'un signal net égal au bruit de fond moyen mesuré (450 ppm), les teneurs déterminées dans les deux menus d'analyse sont en bon accord (Figure 37b). Pour les concentrations plus faibles, la teneur calculée dans le menu d'analyse des éléments majeurs est le plus souvent très supérieure à celle déterminée dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces ; c'est cette dernière valeur qui doit être gardée lors du calcul de la composition finale de l'échantillon.

La limite de détection de l'or dans le menu d'analyse des éléments majeurs est de 550 ppm. La corrélation entre les teneurs déterminées dans les deux menus d'analyse semble bonne au regard de la Figure 37c. L'examen des valeurs individuelles montre néanmoins que des différences importantes apparaissent pour les teneurs en or supérieures à 500 ppm. L'échelle logarithmique utilisée pour présenter ces résultats atténue la perception de ces écarts, néanmoins des facteurs importants apparaissent fréquemment entre les teneurs déterminées à partir des deux menus d'analyse. Il s'agit vraisemblablement de la saturation du détecteur qui entraîne une sous-estimation du signal mesuré pour l'or. Les écarts ont tendance à s'amenuiser quand les teneurs en or s'approchent de la limite de détection calculée pour cet élément dans le menu d'analyse des éléments majeurs. Pour les valeurs inférieures, des écarts importants peuvent être observés pour certains échantillons. La limite de 550 ppm entre les teneurs en or calculées à partir des deux menus d'analyse semble donc tout à fait appropriée.

Le plomb est l'élément pour lequel la variabilité entre les teneurs déterminées dans les deux menus d'analyse est la plus importante. La limite de détection du plomb calculée dans le menu d'analyse des éléments majeurs en profils de concentration est de 300 ppm. Cette valeur est nettement plus faible que les teneurs en plomb mesurées d'une manière générale dans les monnaies anciennes à base d'argent. Cet élément est en effet celui qui présente le plus souvent la teneur la plus importante parmi les cinq dosés dans les deux menus

d'analyse. Comme le montre la Figure 37d, l'ordre de grandeur des concentrations de cet élément dans les monnaies étudiées est d'environ 10000 ppm, soit 1 %. La question du choix de la valeur à privilégier entre les deux menus d'analyse pour cet élément se pose donc très rarement ; c'est quasi-systématiquement la concentration obtenue lors de l'analyse des éléments majeurs qui sera conservée.

Les teneurs en bismuth obtenues lors des analyses de monnaies anciennes présentées sur la Figure 37e sont également pour une grande majorité d'entre elles supérieures à la limite de détection calculée pour le menu d'analyse des éléments majeurs (100 ppm). C'est donc la plupart du temps la teneur obtenue à partir des profils de concentration dans le menu d'analyse des éléments majeurs qui sera conservée pour le bismuth.

Pour le zinc et pour l'étain essentiellement, les teneurs obtenues selon les deux menus d'analyses peuvent présenter des différences non négligeables dans certains cas pour les valeurs légèrement supérieures à la limite de détection calculée pour le menu d'analyse des éléments majeurs. Il convient donc de privilégier les concentrations obtenues à partir du menu d'analyse des éléments mineurs et traces : peut-être les limites de détection calculées pour le menu d'analyse des éléments majeurs sont-elles légèrement sous-estimées pour ces deux éléments.

La bonne corrélation entre les teneurs déterminées dans le menu d'analyse des éléments majeurs et dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces observée autour de la limite de détection de l'analyse en profil de concentration pour les cinq éléments mineurs principaux, montre enfin que les alliages de référence utilisés pour les deux menus d'analyse sont cohérents entre eux.

#### *ix - Les alliages de référence*

La procédure de calcul des concentrations développée par le passé pour l'analyse par LA-ICP-MS au Centre Ernest Babelon fait intervenir des matériaux de référence dont la composition est connue ou certifiée, et proche de celle des objets que l'on souhaite caractériser.

Les alliages de référence utilisés pour le calcul des concentrations dans le menu d'analyse des éléments majeurs sont de deux types et proviennent de deux origines différentes.

Les premiers sont des alliages binaires purs argent-cuivre dont la composition est certifiée par le fournisseur (Rand Refinery Limited, Afrique du

Sud). Les teneurs précises de ces alliages nommés RAgA1, RAgA3, RAgA4 et RAgA5 contenant entre 60 % et 97 % d'argent environ apparaissent dans le Tableau 3. Ces alliages de référence sont les premiers dont nous ayons disposé. D'autres alliages de référence disponibles sur le marché ont par la suite été utilisés : il s'agit d'argent pur dopé avec quelques dizaines ou centaines de ppm de nombreux éléments-traces. Aucun de ces deux types d'alliages ne permet toutefois d'analyser les cinq éléments mineurs principaux dans le menu d'analyse des éléments majeurs.

Il n'existe pas d'alliage argent-cuivre de composition certifiée contenant les cinq éléments mineurs principaux, avec des concentrations qui permettent leur analyse en profils de concentration. La nécessité de doser ces éléments dans le menu d'analyse des éléments majeurs quand leur teneur devient relativement importante nous a conduit à faire fabriquer de tels alliages par un laboratoire de métallurgie (Centre d'Etude de Chimie Métallurgique, Vitry-sur-Seine, France). Les quantités souhaitées de chaque métal ont été fournies par nos soins à ce laboratoire, qui a réalisé leur fusion dans un four à lévitation afin de garantir leur homogénéité. Il s'agit de deux alliages argent-cuivre nommés EV1 et EV2 contenant à hauteur de 2 % les cinq éléments mineurs principaux désirés (Zn, Sn, Au, Pb et Bi). Leur composition précise apparaît dans le Tableau 4.

Alliage de référence	Ag (%)	Cu (%)
<b>RAgA1</b>	96,94	3,03
<b>RAgA3</b>	91,50	8,47
<b>RAgA4</b>	79,94	20,03
<b>RAgA5</b>	59,89	40,10

**Tableau 3** - Composition des alliages binaires de composition certifiée utilisés comme références pour l'étalonnage externe dans la procédure de calcul des teneurs des éléments majeurs.

Alliage de référence	Ag (%)	Cu (%)	Zn (%)	Sn (%)	Au (%)	Pb (%)	Bi (%)
EV1	<b>75,0</b>	<b>15,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>
EV2	<b>45,0</b>	<b>45,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>

**Tableau 4** - Composition des alliages argent-cuivre contenant les cinq éléments mineurs principaux confectionnés à notre demande afin d'être utilisés comme matériaux de référence pour le calcul des concentrations dans le menu d'analyse des éléments majeurs.

Les teneurs des différents éléments contenus dans ces deux derniers alliages ne sont pas certifiées. Ils ont donc été analysés par ANRC, et par LA-ICP-MS les uns par rapport aux autres pour s'assurer que les compositions réelles correspondent à celles souhaitées. Cette procédure n'est pas détaillée ici : elle fait partie intégrante du processus de validation du protocole analytique développé pour

l'analyse des éléments majeurs dans les monnaies d'argent. Nous pouvons toutefois d'ores et déjà indiquer que les compositions réelles de ces deux alliages sont en bon accord avec les compositions désirées ; EV1 et EV2 ont donc été utilisés comme alliages de référence pour l'analyse de l'argent, du cuivre et des cinq éléments mineurs principaux dans le menu d'analyse des éléments majeurs.

## **5. L'analyse des éléments mineurs et traces**

### ***a. Les éléments dosés***

Les monnaies anciennes en argent sont, le plus souvent, constituées d'un alliage argent-cuivre. Ces deux métaux apportent, sans que le métallurgiste ou monnayeur en ait eu conscience, un cortège d'impuretés dont les teneurs sont extrêmement variables. Ces éléments, qualifiés de « mineurs et traces », doivent être analysés pour permettre une caractérisation complète des alliages monétaires. Certains d'entre eux peuvent différencier des sources de métal, et donc servir de base à des études de provenance lors de l'interprétation historique des résultats analytiques.

Une analyse en mode « scanning » peut être effectuée pour identifier les éléments présents au sein de l'alliage. En procédant de cette manière, l'appareil mesure le signal de chaque masse pour une gamme définie à l'avance. On pourra, par exemple, pratiquer de la sorte sur quelques échantillons en préalable à l'analyse d'un *corpus* plus large, afin de s'assurer que tous les éléments pour lesquels un signal est détecté sont inclus dans le menu d'analyse.

Le choix des éléments mesurés dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces de notre protocole de caractérisation des monnaies d'argent par LA-ICP-MS s'est fait selon deux critères.

Le premier critère de choix des éléments mineurs et traces dosés dans ce menu d'analyse est lié à la connaissance des monnaies d'argent. Les résultats d'analyses publiées dans les études antérieures spécifiques à la provenance des métaux précieux ont été utilisés.

Les cinq éléments mineurs principaux cités dans la partie traitant de la mise au point du protocole d'analyse des éléments majeurs (Zn, Sn, Au, Pb, Bi) doivent également être dosés dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces. D'autres éléments, qui au contraire des précédents ne peuvent être dosés en profils de concentration conjointement à l'argent et au cuivre, ont été ajoutés : il s'agit de Fe, Ni, As et Sb. Les éléments du groupe du platine, susceptibles de se révéler utiles pour la distinction de stocks de métaux précieux différents, ont également été

intégrés au menu d'analyse des éléments mineurs et traces. Il s'agit de Ru, Rh, Pd, Os, Ir et Pt. L'indium (In), dont la contribution à des problématiques de provenance d'argent monnayé a été démontrée par le passé (Barrandon *et al.*, 1991 ; Barrandon *et al.*, 1992), ainsi que le mercure (Hg), sont également dosés dans ce menu.

Le second critère de choix des éléments mineurs et traces dosés tient à la composition des alliages de référence dont nous disposons. Les teneurs certifiées d'un grand nombre d'éléments, pour trois des cinq alliages utilisés pour l'étalonnage externe lors des calculs des concentrations, garantissent la fiabilité de leur dosage dans les monnaies anciennes. C'est le cas pour seize éléments : Fe, Ni, Zn, Cu, As, Se, Pd, Cd, Sn, Sb, Te, Pt, Au, Pb, Tl et Bi. Quatre de ces éléments – en dehors du cuivre – ne font pas partie de la liste établie dans le paragraphe précédent : Se, Cd, Te et Tl. Le dosage de ces constituants ne semble pas présenter d'intérêt particulier pour les études de provenance concernant les alliages monétaires à base d'argent ; néanmoins, leur présence dans les matériaux de référence justifie de les analyser également. Les très faibles limites de détection caractérisant la méthode LA-ICP-MS permettront peut-être de mettre en évidence des différences de teneurs pour ces éléments présents à de très faibles teneurs. Ce sont ainsi finalement vingt-deux éléments mineurs et traces qui ont été intégrés dans ce menu d'analyse.

### ***b. Le choix des isotopes***

Le choix des isotopes mesurés pour l'analyse des éléments mineurs et traces doit être réfléchi, et doit être défini en tenant compte des particularités de composition des monnaies anciennes en argent. Le plus souvent, c'est l'isotope qui présente l'abondance isotopique la plus élevée, qui a été choisi : les éléments mesurés dans ce menu d'analyse sont très peu concentrés, il convient donc de définir des paramètres analytiques qui permettent d'obtenir un maximum de signal.

Un autre facteur doit toutefois être pris en compte lors du choix des isotopes : il s'agit des interférences. Un isotope peu abondant d'un élément très peu concentré pourra ainsi être choisi au détriment du plus abondant si sa masse est identique à celle d'un isotope d'un autre élément dosé.

Les recombinaisons avec l'argon doivent également être prises en compte. Les isotopes pour lesquels une recombinaison peut interférer, doivent être évités d'une manière générale, et plus encore pour l'analyse des éléments mineurs et traces dans les monnaies d'argent : les réglages de l'ICP-MS sont en effet effectués de manière à favoriser les recombinaisons pour maximiser la formation de l'espèce  $^{147}\text{Ar-Ag}^+$  utilisée comme étalon interne dans ce menu.

La liste exhaustive des éléments dosés dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces apparaît dans le Tableau 5. Les isotopes détectés pour chacun de ces éléments, ainsi que les interférences possibles, sont également présentés.

Elément	Isotope(s) détecté(s)	Abondance(s) isotopique(s)	Interférence(s)
Fe	56	91,7 %	$^{40}\text{Ar}-^{16}\text{O}^+$
Ni	60	26,1 %	-
Cu	65	30,8 %	-
Zn	68	18,8 %	-
As	75	100 %	-
Se	78	23,6 %	$^{78}\text{Kr}$ ; $^{40}\text{Ar}-^{38}\text{Ar}^+$
Ru	101	17,0 %	-
Rh	103	100 %	$^{40}\text{Ar}-^{63}\text{Cu}^+$ ; $^{38}\text{Ar}-^{65}\text{Cu}^+$
Pd	104	11,1 %	$^{104}\text{Ru}$
Cd	111	12,8 %	-
In	115	95,7 %	$^{115}\text{Sn}$
Sn	118	24,2 %	-
Sb	121	57,3 %	-
Te	125 ; 128	7,14 % ; 31,7 %	-
Ag	147* ; 149*	51,8 % ; 48,2 %	$^{147}\text{Sm}$ ; $^{149}\text{Sm}$
Os	189	16,1 %	-
Ir	193	62,7 %	-
Pt	194 ; 195	32,9 ; 33,8 %	-
Au	197	100 %	-
Hg	202	29,8 %	-
Pb	204 ; 206	1,4 % ; 52,4 %	$^{204}\text{Hg}$ ; -
Tl	205	70,5 %	-
Bi	209	100 %	-

**Tableau 5** - Tableau récapitulatif des éléments dosés dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces ainsi que des isotopes détectés, de leur abondance isotopique et des interférences possibles. Les masses auprès desquelles apparaît un astérisque sont des recombinaisons d'un isotope de l'élément avec l'argon.

Le choix d'opérer dans des conditions favorisant les recombinaisons pour l'analyse des éléments mineurs et traces présente des inconvénients. Le premier concerne le dosage du fer. La recombinaison  $^{56}\text{Ar}-\text{O}^+$  crée en effet une interférence importante avec l'isotope  $^{56}\text{Fe}$ . L'isotope du fer à la masse 56 est prépondérant, et les autres existant à l'état naturel  $^{54}\text{Fe}$ ,  $^{57}\text{Fe}$  et  $^{58}\text{Fe}$  sont trop peu abondants pour permettre leur détection. Une interférence isobarique existe de plus pour l'isotope  $^{58}\text{Fe}$  avec  $^{58}\text{Ni}$ . En conséquence, le fer est détecté à la masse 56, et le signal obtenu est l'addition de celui de cet isotope, et de celui de la recombinaison  $^{56}\text{Ar}-\text{O}^+$ . Bien souvent, la quantité d'espèces  $^{56}\text{Ar}-\text{O}^+$  formées est telle que le signal détecté à la masse 56 est similaire au bruit de fond. Le dosage du fer se trouve entaché d'une erreur importante. Cela n'est toutefois que peu dommageable pour l'interprétation historique des résultats analytiques : le fer n'est pas un élément susceptible de permettre la différenciation de stocks de métaux d'origines différentes pour des études de provenance.



Le dosage d'un autre élément-trace dans ce menu d'analyse se trouve également entaché d'une erreur plus importante du fait des conditions opératoires destinées à favoriser les recombinaisons : il s'agit du rhodium. Le rhodium possède un seul isotope, à la masse 103. La recombinaison entre l'isotope 63 du cuivre, élément dont la teneur est le plus souvent d'au moins plusieurs pourcents dans les monnaies d'argent, et l'argon de masse 40, conduit à la formation de l'espèce  $^{103}\text{Ar-Cu}^+$ . Le signal mesuré à la masse 103 correspondra donc à l'addition de celui de  $^{103}\text{Rh}$  et de  $^{103}\text{Ar-Cu}$ . Le rhodium est un élément monoisotopique. Seul un calcul impliquant les signaux mesurés de  $^{103}\text{Ar-Cu}$ , de  $^{105}\text{Ar-Cu}$ , de  $^{103}\text{Pd}$  et de  $^{104}\text{Pd}$  pourrait permettre de corriger cette interférence. L'incertitude sur l'ensemble des calculs nécessaires pour effectuer cette correction est cependant telle que la teneur obtenue pour le rhodium n'aurait pas de véritable sens.

L'interférence de  $^{115}\text{Sn}$  avec  $^{115}\text{In}$  peut entraîner une surestimation de la teneur en indium pour les monnaies qui contiennent une quantité importante d'étain. Un calcul de correction du signal net calculé pour l'indium à partir de celui de l'étain permet de s'affranchir de cette interférence, et ainsi de déterminer la teneur réelle en indium.

Les autres interférences mentionnées dans le Tableau 5 concernent des isotopes mineurs d'éléments présents à de très faibles concentrations et sont négligeables par rapport à l'isotope que l'on souhaite doser ici.

### *c. Le mode d'acquisition des données*

Les éléments mineurs et traces sont, du moins pour les plus concentrés d'entre eux, susceptibles de présenter des variations de teneurs entre la surface et l'intérieur des monnaies, au même titre que l'argent et le cuivre. Il conviendrait donc, idéalement, de déterminer leurs concentrations en effectuant des profils de concentration comme cela est pratiqué pour les éléments majeurs. Cela impliquerait l'acquisition de leur signal en temps réel.

Des essais ont démontré que le signal des éléments mineurs et traces dosés dans ce menu d'analyse – à l'exception des cinq éléments mineurs principaux dosés également dans le menu d'analyse des éléments majeurs – ne peut être acquis en temps réel. Leurs très faibles teneurs imposent que le signal de chaque isotope soit accumulé pendant une certaine durée afin d'obtenir des valeurs suffisantes pour permettre le calcul des concentrations (mode Average Single Spot Analysis). On obtient ainsi une unique valeur pour chaque isotope et chaque prélèvement qui sera utilisée pour le calcul des concentrations.

#### ***d. Les paramètres de l'ablation laser***

Les essais réalisés lors du développement du protocole d'analyse des éléments majeurs ont permis d'acquérir une bonne connaissance des alliages d'argent et de leur structure interne. Ce sont ces bases qui ont été utilisées pour la définition des paramètres employés pour l'analyse des éléments mineurs et traces.

##### *i - La taille des cratères d'ablation*

Le diamètre des micro-prélèvements défini pour l'analyse des éléments majeurs semble permettre d'obtenir des teneurs représentatives de l'ensemble de l'alliage quelle que soit la composition de l'alliage. Le même diamètre de 80  $\mu\text{m}$  a donc été choisi pour l'analyse des éléments mineurs et traces.

##### *ii - La fréquence du laser et la durée de l'ablation*

Les teneurs de certains des éléments mineurs et traces sont susceptibles d'être affectées par les phénomènes d'enrichissement de surface, en particulier pour les plus abondants d'entre eux. Il convient donc de s'affranchir de la couche de surface susceptible d'être perturbée afin de déterminer les teneurs des éléments mineurs et traces dans l'alliage sain comme c'est le cas pour les éléments majeurs.

La nécessité de s'affranchir d'une éventuelle couche de surface perturbée impose de séparer l'analyse des éléments mineurs et traces en deux parties distinctes : une pré-ablation ou « uptake » d'abord, puis l'acquisition proprement dite.

L'ablation laser est continue tout au long de l'analyse ; aucune donnée n'est toutefois acquise durant la première partie du prélèvement. La pré-ablation permet de s'affranchir d'une éventuelle couche de surface dont la composition serait perturbée. Dans un deuxième temps, l'ablation laser se poursuit, et le signal est acquis pour chaque isotope. On suppose que le prélèvement est alors effectué dans l'alliage sain de la monnaie. Le signal peut donc être acquis durant cette seconde phase pour le calcul des concentrations. On obtient ainsi une unique valeur pour chaque isotope et pour chaque prélèvement.

La fréquence définie pour l'analyse des éléments mineurs et traces dans les monnaies d'argent par LA-ICP-MS est légèrement augmentée par rapport à celle définie pour l'analyse des éléments majeurs : elle passe de 5 Hz à 6 Hz. La durée de chaque analyse est ainsi légèrement réduite, et la durée d'une séance complète l'est donc également. La fréquence choisie pour l'analyse des éléments mineurs et traces reste toutefois proche de celle définie pour les éléments majeurs afin

d'obtenir un maximum de signal pour la partie de l'acquisition correspondant à l'ablation de l'alliage sain suite à la pré-ablation.

L'acquisition des données n'est pas effectuée en temps réel dans ce menu d'analyse ; il n'est donc pas possible de visualiser l'enrichissement de surface sur des profils de concentration afin de s'en affranchir. C'est donc l'analyse des éléments majeurs effectuée préalablement sur les mêmes monnaies qui renseignera au cas par cas sur l'importance de la couche superficielle perturbée présente sur chaque échantillon. Cette information pourra alors être utilisée pour fixer les durées de pré-ablation et d'acquisition pour le menu d'analyse des éléments mineurs et traces. En suivant cette approche, il serait nécessaire de définir individuellement les durées respectives de pré-ablation et d'acquisition pour l'analyse des éléments mineurs et traces après examen des profils obtenus sur les mêmes monnaies pour les éléments majeurs. L'expérience acquise à partir de l'analyse des éléments majeurs en profils de concentration a toutefois permis de mettre en évidence qu'une stabilisation des teneurs apparaît dans la majorité des cas après 50 s – pour peu que l'alliage soit homogène à l'échelle du micro-prélèvement.

Pour certains types de monnaies carolingiennes dont le titre est systématiquement supérieur à 90 %, l'enrichissement de surface observé sur les profils est le plus souvent inexistant. La durée nécessaire pour atteindre le plateau de stabilité peut toutefois excéder 100 s pour d'autres types monétaires : cela a été constaté pour certaines des monnaies d'un titre de l'ordre de 30 % d'argent.

C'est donc la connaissance préalable des monnaies étudiées, de leur titre et de l'enrichissement de surface susceptible de les recouvrir, qui détermine la durée de pré-ablation. Toutefois, ce protocole n'est dédié, du moins dans un premier temps, qu'à l'analyse des monnaies présentant un titre relativement élevé, de l'ordre de 70 % d'argent et au-delà. Or, pour de telles compositions, l'étude des profils de concentration obtenus par LA-ICP-MS pour les éléments majeurs à une fréquence de 5 Hz a révélé que la durée observée sur le profil correspondant à l'enrichissement de surface n'excède pas 50 s dans une grande majorité des cas.

Une durée de pré-ablation peut ainsi être définie au préalable pour l'ensemble des échantillons à analyser. Elle pourra être adaptée si nécessaire après examen des profils de concentrations obtenus pour les éléments majeurs.

Cette durée a été déterminée d'après la fréquence définie pour le laser et l'expérience acquise sur la répartition des éléments majeurs et des éléments mineurs principaux analysés en profils de concentration. Elle a été fixée à 40 s : à une fréquence de 6 Hz, le nombre d'impacts laser produits pendant cette durée est équivalent à celui produit pendant 48 s à 5 Hz.

Les réglages de la machine sont effectués dans le but de maximiser le signal obtenu pour les isotopes correspondant aux éléments les moins abondants. Cela conduit fréquemment à la saturation du signal d'un ou plusieurs isotopes des éléments mineurs les plus abondants. Cela se produit d'une manière générale 10 à 20 s après le début de l'acquisition ; quelques secondes supplémentaires sont nécessaires pour qu'une nouvelle acquisition débute. Pendant cette durée, l'ablation laser se poursuit. La durée effective de pré-ablation n'est donc pas dans de tels cas de 40 s comme défini dans le logiciel de l'ICP-MS en préalable à l'analyse, mais le plus souvent de l'ordre de 60 s ou de 80 s. Les alliages de titre relativement faible sont à la fois ceux qui présentent les couches d'enrichissement de surface les plus importantes, et les plus susceptibles de contenir des éléments mineurs à des teneurs importantes ; la saturation de plusieurs isotopes revient donc à allonger la durée de pré-ablation. Cette saturation nous sert donc dans le cas de monnaies présentant un enrichissement de surface à analyser l'alliage sain plutôt que la couche superficielle perturbée.

L'étude de l'évolution des coefficients de réponse présentée dans la partie traitant de la mise au point du protocole d'analyse des éléments majeurs en profils de concentration a montré qu'aucun fractionnement n'apparaît à la fin d'analyses de 300 s à 5 Hz ; l'allongement de la durée de l'ablation laser due à la saturation du signal de certains isotopes n'est donc pas source d'une incertitude importante qui serait due au fractionnement isotopique en cours d'ablation.

#### *e. Le calcul des concentrations*

Le calcul des concentrations suit la procédure décrite précédemment pour chacun des trois micro-prélèvements.

Certains des éléments que nous souhaitons doser ne font pas partie de la liste des constituants dont la teneur est certifiée dans nos alliages de référence. Le coefficient de réponse ne peut donc pas être calculé à partir du signal mesuré pour les isotopes de ces éléments. C'est le cas pour Ru, Rh, Cd, In, Ir, Os et Hg. Pour ces éléments, le coefficient K utilisé pour le calcul des concentrations est celui d'un élément dont la teneur est certifiée dans au moins un des alliages de référence. L'élément choisi doit être proche dans la classification périodique ; son énergie d'ionisation doit être du même ordre, et son comportement chimique similaire ; son comportement lors de l'ablation est, de plus, supposé proche de celui de l'élément utilisé comme référence.

C'est le coefficient de réponse du palladium qui est utilisé pour le calcul des teneurs en ruthénium et en rhodium. Celui de l'étain sert à déterminer les teneurs en cadmium et en indium, tandis que le coefficient du platine est utilisé pour

l'iridium et l'osmium. Enfin, le coefficient K de l'or sert au calcul des teneurs en mercure.

La justesse des teneurs obtenues de cette manière est probablement moins bonne que celle qui caractérise les éléments dont les teneurs sont certifiées par les fournisseurs de nos alliages de référence. Elles permettent toutefois d'obtenir un ordre de grandeur des concentrations de ces éléments dans les monnaies. Et si les teneurs absolues ne sont pas tout à fait exactes, la procédure employée permet de comparer entre elles des valeurs obtenues de la même manière.

Les teneurs calculées pour chaque élément doivent ensuite être normalisées afin d'obtenir la composition exacte des alliages, combinant les données obtenues dans les menus d'analyse des éléments majeurs et des éléments mineurs et traces.

Dans un premier temps, l'ensemble des teneurs des éléments mineurs et traces sont rapportées à la teneur en argent calculée dans le menu d'analyse des éléments majeurs. Puis, pour les cinq éléments dosés dans les deux menus d'analyse, la valeur qui semble la moins pertinente est supprimée au profit de celle obtenue dans l'autre menu d'analyse. On obtient ainsi une unique valeur pour chaque élément. Reste enfin à normaliser la somme de teneurs de tous les éléments à 100 %.

#### *f. Les alliages de référence*

Les alliages de référence utilisés pour le calcul des concentrations des éléments mineurs et traces contenus dans les monnaies d'argent sont de deux types.

Trois alliages sont constitués d'une matrice d'argent contenant de nombreux éléments à des teneurs de l'ordre de quelques dizaines ou quelques centaines de ppm. Ces matériaux de référence RAgP3, RAgP7 et SF1A ont été achetés auprès de Rand Refinery Limited (Germiston, Afrique du Sud) pour les deux premiers et de l'Institute of Non-Ferrous Materials (Gliwice, Pologne) pour le troisième. Les teneurs des éléments-traces qu'ils contiennent sont certifiées par ces fournisseurs.

D'autres alliages constitués d'une matrice argent-cuivre contenant un nombre plus restreint d'éléments mineurs à des teneurs plus importantes ont été commandés auprès du Centre d'Etude de Chimie Métallurgique (Vitry-sur-Seine, France). Ces matériaux ont été réalisés par fusion dans un four à lévitation afin de garantir leur homogénéité. Ces deux alliages EV3 et EV4 contiennent Zn, As, Sn, Sb, Au, Pb et Bi à des teneurs comprises entre 0,05 % et 1,0 %, soit 500 à 10000 ppm.

La composition précise de l'ensemble des alliages de référence utilisés pour le calcul des teneurs en éléments mineurs et traces apparaît dans le Tableau 6.

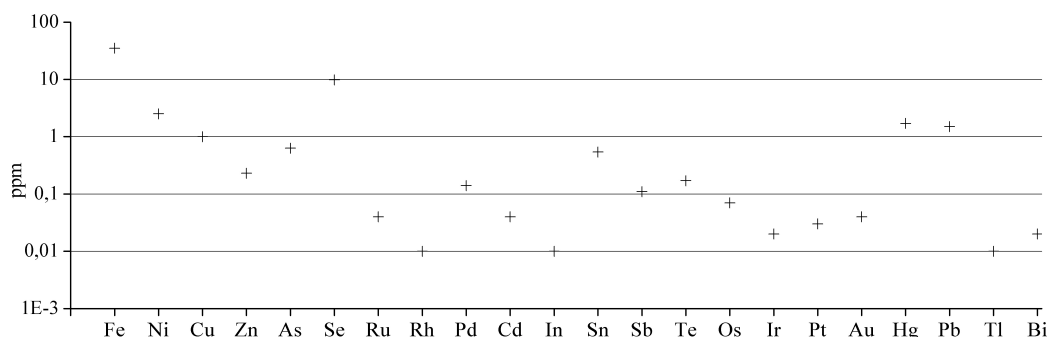
	SF1A	RAgP3	RAgP7	EV3	EV4
<b>Ag</b>	99,86%	99,97%	99,77%	80%	65%
<b>Cu</b>	857	29,9	209	18,20%	32,75%
<b>Fe</b>	42,5	88	17,4	-	-
<b>Ni</b>	58,1	24,4	181	-	-
<b>Zn</b>	79,1	28,7	209	1000	2000
<b>As</b>	41,6	-	-	2000	1000
<b>Se</b>	45	-	-	-	-
<b>Pd</b>	21	25,3	193	-	-
<b>Sn</b>	-	27,2	192	1000	2000
<b>Sb</b>	58,1	26,7	185	1000	500
<b>Te</b>	43,9	26,1	181	-	-
<b>Pt</b>	20,9	26,7	187	-	-
<b>Au</b>	21,9	39,4	216	2000	5000
<b>Pb</b>	83,8	26,7	194	10000	10000
<b>Bi</b>	53,7	24,5	231	1000	2000

**Tableau 6** - Composition des alliages de référence utilisés pour le calcul des concentrations dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces.  
Sauf mention contraire, toutes les teneurs sont exprimées en ppm.

### *g. Les limites de détection*

Les limites de détection des éléments dosés dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces ont été déterminées à partir de valeurs de signal correspondant à trois fois l'écart-type calculé sur 20 mesures du bruit de fond. La valeur de signal net obtenue a été soumise à la procédure habituelle de calcul des concentrations dans les conditions définies pour l'analyse des éléments mineurs et traces.

Les limites de détection des éléments dosés dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces apparaissent sur la Figure 38.



**Figure 38** - Limites de détection des éléments dosés dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces. Echelle logarithmique en ordonnée.

D'une manière générale, les limites de détection sont plus hautes pour les éléments les plus légers. La valeur particulièrement élevée pour le fer est due à l'interférence de l'isotope détecté pour cet élément avec la recombinaison  $^{56}\text{Ar-Fe}^+$ . En dehors de cet élément, les limites de détection calculées sont pour l'essentiel comprises entre 0,01 ppm et 1 ppm.

## **6. Déroulement d'une séance d'analyse de monnaies d'argent**

Les paramètres analytiques étant définis, voyons maintenant le déroulement pratique d'une séance d'analyse de monnaies d'argent par LA-ICP-MS.

Les réglages de l'ICP-MS sont effectués avant la séance d'analyse. Pour cela, le verre de référence NIST 610 est soumis à une ablation laser sans collimateur à une fréquence de 10 Hz. L'évolution du signal est observée en fonction du temps pour les isotopes  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{115}\text{In}$  et  $^{238}\text{U}$ , dont les éléments correspondants sont présents à hauteur de 400 à 500 ppm dans ce verre.

Les flux de gaz nébuliseur et auxiliaire, et si nécessaire les tensions appliquées aux lentilles électrostatiques de l'ICP-MS, sont ajustés en début de séance si le signal mesuré est insuffisant, ou si au contraire les valeurs laissent préjuger d'un risque de saturation du détecteur. Un nombre de coups brut de l'ordre de  $10^6$  sur chacun des trois isotopes étudiés, permet d'avoir un signal adapté pour l'ensemble des isotopes que l'on souhaite détecter dans le menu d'analyse des éléments majeurs sans risquer la saturation. L'option S, qui permet d'améliorer le vide primaire et donc d'optimiser le rapport signal/bruit, est utilisée lors de l'analyse des éléments mineurs et traces.

Les réglages de gaz diffèrent légèrement entre l'analyse des éléments majeurs et celle des éléments mineurs et traces. Le signal mesuré dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces est optimisé après un léger recul de la torche destiné à favoriser les recombinaisons : il est en effet indispensable que le signal de l'étalon interne  $^{147}\text{Ar-Ag}^+$  soit optimisé dans le but d'améliorer la précision des analyses.

Les informations relatives aux conditions opératoires et aux réglages de l'appareil sont regroupées dans le Tableau 7.

	Menu d'analyse des éléments majeurs	Menu d'analyse des éléments mineurs et traces
Flux de gaz nébuliseur	1 L. min <sup>-1</sup>	0,9 L. min <sup>-1</sup>
Flux de gaz auxiliaire	1 L. min <sup>-1</sup>	1,1 L. min <sup>-1</sup>
Flux de gaz de refroidissement	14 L. min <sup>-1</sup>	14 L. min <sup>-1</sup>
Laser	Nd YAG (266 nm)	Nd YAG (266 nm)
Fréquence du laser	5 Hz	6 Hz
Diamètre des cratères	80 µm	80 µm
Pression dans l'interface	2,5 mbar	1,8 mbar (pompe auxiliaire – « option S »)
Mode d'acquisition	Peak Jumping	Time Resolved Analysis
Durée de l'acquisition sur chaque masse	10 ms	10 ms
Durée de la pré-ablation	-	40 s
Durée de l'acquisition	300 s	60 s

**Tableau 7** - Récapitulatif des paramètres expérimentaux utilisés pour l'analyse des éléments majeurs et des éléments mineurs et traces dans les monnaies d'argent par LA-ICP-MS.

Trois profils sont effectués sur chaque monnaie pour l'analyse des éléments majeurs. Une série de cinq matériaux de référence est analysée en début de séance puis une série de pièces ; une seconde série d'alliages de référence est alors à nouveau analysée au milieu de la séance, puis les monnaies restantes, et enfin une dernière série de matériaux de référence.

Le calcul des concentrations des éléments majeurs contenus dans les échantillons doit être effectué non pas à la fin de la séance, mais régulièrement au cours de celle-ci. Il est en effet nécessaire de s'assurer de l'homogénéité de chaque monnaie à l'échelle du micro-prélèvement et de la linéarité des profils. Les trois profils obtenus à partir des ablations effectuées sur un même échantillon peuvent être superposés afin de s'assurer que les teneurs se stabilisent autour de la même valeur. Dans le cas contraire, une quatrième analyse pourra être ajoutée au cours de la séance.

En fin de séance, la procédure de calcul des coefficients de réponse est appliquée à chacun des matériaux de référence analysés ; pour chaque élément, la moyenne des coefficients obtenus pour chaque intervalle de temps est calculée. Ces coefficients de réponse sont alors utilisés pour le calcul des teneurs en argent et en cuivre, et pour celle des cinq éléments mineurs principaux dosés également dans le menu d'analyse des éléments majeurs. Pour chaque élément et pour chaque profil, une valeur moyenne de la teneur est calculée sur la zone correspondant à l'alliage sain ; la moyenne des teneurs est alors calculée pour l'ensemble des trois profils, ou des profils exploitables si certains ont été exclus.

La composition des matériaux de référence est également calculée en appliquant au signal obtenu pour ces alliages la même procédure que celle utilisée



pour les échantillons de composition inconnue. On s'assure ainsi de la justesse des analyses en comparant les teneurs obtenues ainsi aux valeurs certifiées.

## **C. Validation du protocole analytique**

Les paramètres expérimentaux du protocole d'analyse des monnaies d'argent par LA-ICP-MS ont été définis dans le chapitre précédent. Celui-ci traite de manière approfondie chacun de ses aspects afin de s'assurer de la pertinence de l'application de cette méthode à ce type d'échantillons, et d'en définir les limitations.

### **I. L'analyse des alliages de référence par Activation aux Neutrons Rapides de Cyclotron**

Le protocole d'analyse des monnaies d'argent par LA-ICP-MS intègre un étalonnage externe effectué à l'aide d'alliages de composition connue. La justesse des analyses par LA-ICP-MS dépend donc de celle des teneurs des différents éléments contenus dans les alliages de référence utilisés pour cet étalonnage. Ces alliages, de composition certifiée ou non, ont donc été analysés par ANRC afin de s'assurer que les teneurs proposées sont justes.

Parmi les onze alliages de référence disponibles pour l'étalonnage externe des monnaies d'argent, seuls huit ont été analysés par ANRC : les quatre alliages binaires argent-cuivre de composition certifiée (RAgA1, RAgA3, RAgA4 et RAgA5), et les quatre alliages préparés à notre demande par un laboratoire de métallurgie (EV1, EV2, EV3 et EV4). Les trois matériaux de référence constitués d'une matrice d'argent contenant de nombreux éléments à de très faibles teneurs n'ont pas pu être étudiés par ANRC. Les teneurs des éléments-traces dans ces alliages sont en effet trop faibles pour la plupart d'entre elles pour que cette analyse révèle leur présence.

Les alliages de référence analysés par ANRC sont des matériaux modernes. Leur structure est supposée homogène à l'échelle de l'analyse par LA-ICP-MS ; ils ne présentent pas d'hétérogénéités de composition entre leur surface et l'intérieur, au contraire de la majorité des monnaies anciennes. En conséquence, une méthode globale comme l'ANRC convient pour s'assurer que la composition de ces matériaux est celle certifiée par le fournisseur pour les alliages RAgAx ou celle souhaitée pour les alliages EVx. La comparaison entre les teneurs certifiées ou attendues des alliages RAgAx et EVx avec les valeurs obtenues par ANRC apparaît dans les Tableaux 8 et 9.

Référence		Ag	Cu
RAgA1	Teneur calculée (%)	97,25	2,75
	Teneur certifiée (%)	96,94	3,03
RAgA3	Teneur calculée (%)	90,81	9,19
	Teneur certifiée (%)	91,50	8,47
RAgA4	Teneur calculée (%)	80,11	19,89
	Teneur certifiée (%)	79,94	20,03
RAgA5	Teneur calculée (%)	61,80	38,20
	Teneur certifiée (%)	59,89	40,10

**Tableau 8** - Comparaison des teneurs certifiées dans les alliages de référence RAgAx avec les teneurs déterminées par ANRC.

Référence		Ag	Cu	Zn	As	Sn	Sb	Au	Pb	Bi
EV1	Teneur calculée (%)	74,4	15,0	1,8	-	1,8	-	2,0	2,9	nd
	Teneur attendue (%)	75,0	15,0	2,0	-	2,0	-	2,0	2,0	2,0
EV2	Teneur calculée (%)	45,7	42,8	1,9	-	1,9	-	2,2	2,9	nd
	Teneur attendue (%)	45,0	45,0	2,0	-	2,0	-	2,0	2,0	2,0
EV3	Teneur calculée (%)	80,2	17,5	nd	0,18	0,09	0,09	0,21	1,7	nd
	Teneur attendue (%)	80,0	18,2	0,10	0,20	0,10	0,10	0,20	1,0	0,10
EV4	Teneur calculée (%)	65,4	32,1	nd	0,09	0,21	0,04	0,50	1,5	nd
	Teneur attendue (%)	65,0	32,8	0,20	0,10	0,20	0,05	0,50	1,0	0,20

**Tableau 9** - Comparaison des teneurs supposées dans les alliages de référence EVx avec les teneurs déterminées par ANRC.

Les matériaux de référence RAgA1, RAgA3, RAgA4 et RAgA5 sont des alliages binaires argent-cuivre purs ; les alliages EV1 à EV4 contiennent, outre les deux constituants majeurs que sont l'argent et le cuivre, les cinq éléments mineurs principaux à hauteur de 2 % pour EV1 et EV2, et ces cinq éléments ainsi que de l'antimoine et de l'arsenic à différentes teneurs pour EV3 et EV4.

L'analyse par ANRC ne permet pas la caractérisation du bismuth ; cet élément ne peut donc pas être pris en compte pour la comparaison entre les compositions attendues et celles obtenues par ANRC. La somme totale des teneurs des autres éléments déterminées par cette méthode a été rapportée à 100 % afin de pouvoir comparer les valeurs entre elles.

Pour l'argent comme pour le cuivre, les concentrations calculées par ANRC sont en bon accord avec les valeurs attendues pour les alliages binaires purs (RAgAx) et pour ceux qui contiennent des éléments mineurs (EVx). La différence la plus importante pour l'argent est observée pour l'alliage dont la teneur pour cet élément est la plus faible (EV2). L'écart relatif entre les deux valeurs est toutefois inférieur à 2 % relatifs (45,7 % pour 45 % attendus), ce qui est tout à fait acceptable pour une telle teneur en argent. Les concentrations en argent et en cuivre

dans l'ensemble des alliages de référence peuvent donc être utilisées pour le calcul des coefficients de réponse lors de l'analyse de monnaies anciennes.

Les éléments mineurs et traces contenus dans les alliages de référence qui peuvent être caractérisés par ANRC sont Zn, As, Sn, Sb, Au et Pb.

Les résultats obtenus pour Zn, Sn, As, Sb et Au sont en bon accord avec les valeurs attendues pour ces éléments. Les écarts calculés entre les deux valeurs sont en effet systématiquement inférieures à 10 % relatifs. Les teneurs en zinc dans les alliages EV3 et EV4 n'ont pu être déterminées par ANRC car elles sont trop faibles pour en permettre la mesure par cette méthode et dans les conditions de nos mesures.

Les teneurs en plomb déterminées par ANRC dans les alliages de référence EV1, EV2, EV3 et EV4 sont supérieures d'environ 50 % aux valeurs attendues pour ces alliages. Une source possible de surestimation des teneurs en plomb dans des échantillons riches en argent peut être liée à une interférence entre les radio-isotopes de l'argent et du plomb d'énergie de désintégration identique. Une mesure par spectrométrie gamma effectuée après la décroissance du radio-isotope du plomb dont l'énergie caractéristique est de 279,0 keV, aurait pu contribuer à comprendre cette surestimation. Cela n'a toutefois pas été possible du fait de contraintes pratiques liées à l'utilisation du même dispositif de mesure par d'autres opérateurs.

## **II. La précision des mesures**

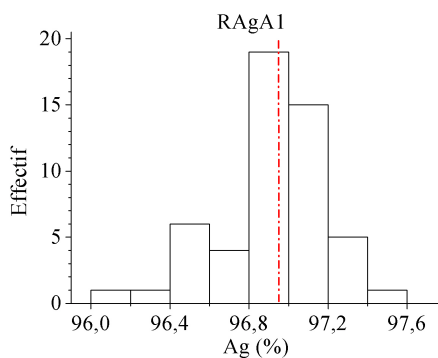
La seconde étape de la validation du protocole d'analyse des monnaies d'argent par LA-ICP-MS concerne la précision des mesures. Dans cette optique, les alliages de référence utilisés pour le calcul des concentrations dans les échantillons de composition inconnue ont été analysés les uns par rapport aux autres.

Pour les alliages EV1 à EV4 fabriqués à notre demande et dont les compositions ne sont pas certifiées, ces expérimentations visaient également à s'assurer de leur cohérence avec les matériaux de référence fournis avec certification de leur composition.

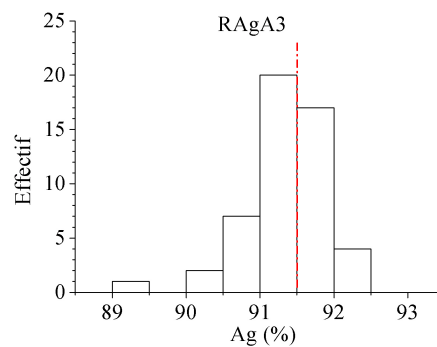
## 1. L'analyse des alliages de référence utilisés dans le menu d'analyse des éléments majeurs

### a. Les alliages binaires argent-cuivre purs

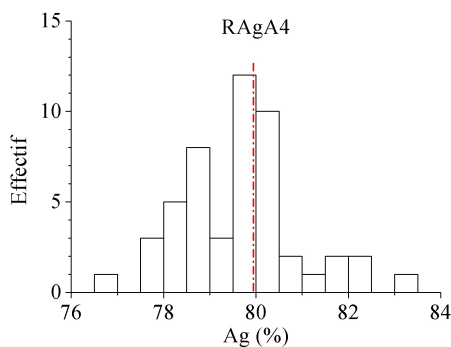
Les quatre alliages binaires argent-cuivre purs ont été analysés selon la procédure présentée dans le paragraphe précédent. Cinquante analyses environ, effectuées sur une période de deux ans, ont été utilisées pour chacun de ces alliages de référence. Les résultats obtenus sont présentés sous forme d'histogrammes de répartition (Figures 39a à 39d).



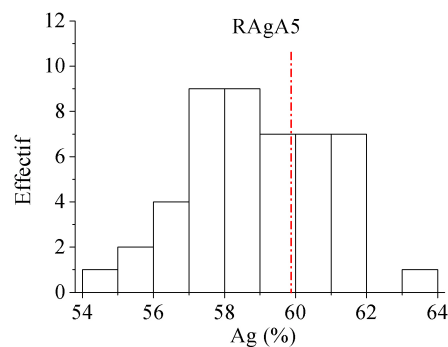
**39a.** Teneur moyenne calculée : 96,93 % ;  
teneur certifiée : 96,94 %



**39b.** Teneur moyenne calculée : 91,25 % ;  
teneur certifiée : 91,50 %



**39c.** Teneur moyenne calculée : 79,65 % ;  
teneur certifiée : 79,94 %



**39d.** Teneur moyenne calculée : 58,36 % ;  
teneur certifiée : 59,89 %

**Figures 39a à 39d** - Comparaison des teneurs en argent certifiées dans les alliages de référence RAgA1 à RAgA5 avec les teneurs déterminées en utilisant les autres alliages certifiés comme références.

La teneur en argent certifiée pour l'alliage de référence RAgA1 est de 96,94 % ; la teneur moyenne calculée à partir des 52 analyses effectuées sur cet étalon est très proche (96,93 %). Cet alliage contient plus de 91,73 % d'argent ; sa structure est donc monophasée si l'on se reporte au diagramme de phase argent-

cuivre (voir *infra* p. 22). La structure monophasée de cet alliage explique que l'incertitude sur les teneurs en argent obtenues soit très faible : les valeurs déterminées sont comprises entre 96,05 % et 97,48 %, soit un écart relatif systématiquement inférieur à 1 % par rapport à la valeur certifiée de 96,94 %.

Les trois autres alliages binaires RAgA3, RAgA4 et RAgA5 achetés dans le commerce, et dont les teneurs en argent et en cuivre sont certifiées par le fournisseur, présentent une structure biphasée de par leur composition.

La teneur moyenne en argent calculée pour RAgA3 est de 91,25 %, soit une valeur très proche de la valeur certifiée par le fabricant (91,50 %). L'écart relatif entre la teneur calculée et la teneur certifiée est inférieur à 1 % relatif dans 53 cas sur 57 pour ce matériau de référence, soit 93 % des mesures. La composition de cet alliage est proche de la composition limite pour laquelle l'alliage est monophasé ; cette proximité explique la faible dispersion des valeurs : les phases de composition eutectique contenues dans RAgA3 sont vraisemblablement rares et relativement dispersées.

La moyenne des teneurs en argent déterminées pour RAgA4 est également en très bon accord avec la valeur certifiée : notre valeur moyenne est en effet de 79,65 %, alors que le fournisseur garantit une teneur de 79,94 %. L'écart est plus important pour RAgA5 (58,36 % pour 59,89 %) mais reste raisonnable, inférieur à 3 % relatifs.

La variabilité des analyses de l'argent et du cuivre dans les alliages modernes de composition certifiée semble augmenter quand la teneur en argent diminue. La dispersion des teneurs en argent et en cuivre est en effet plus importante pour les deux alliages RAgA4 et RAgA5, contenant respectivement 79,94 % et 59,89 % d'argent, que pour RAgA1 et RAgA3 qui contiennent tous deux plus de 90 % d'argent.

Pour RAgA4, 73 % des teneurs en argent déterminées en considérant cet alliage comme un échantillon de composition inconnue, sont comprises dans un intervalle de plus ou moins 2 % relatifs autour de la valeur certifiée, soit un intervalle de 78,34 % à 81,54 % ; l'écart relatif est inférieur à 5 % pour l'ensemble des valeurs obtenues pour cet alliage dont la teneur en argent est certifiée à 79,94 %. La dispersion des résultats est légèrement supérieure pour l'alliage de référence RAgA5 : 36 % des teneurs en argent obtenues sont comprises dans un intervalle de plus ou moins 2 % relatifs autour de la valeur certifiée de 59,89 % ; le pourcentage s'élève à 83 % si l'on élargit cet intervalle à 5 % relatifs. Pour 17 %

des valeurs, l'écart entre la teneur certifiée et la teneur calculée est compris entre 5 % et 10 % relatifs.

La variabilité ponctuelle des teneurs en argent mesurées dans les alliages de référence en analysant ceux-ci les uns par rapport aux autres se traduit, lors de l'analyse de monnaies anciennes, par une incertitude sur le calcul des coefficients de réponse des éléments concernés. De ce fait, la variabilité des teneurs en argent et en cuivre observée pour les alliages binaires RAgAX peut entraîner une erreur sur le calcul du coefficient de réponse du cuivre et donc sur le dosage de cet élément dans les échantillons.

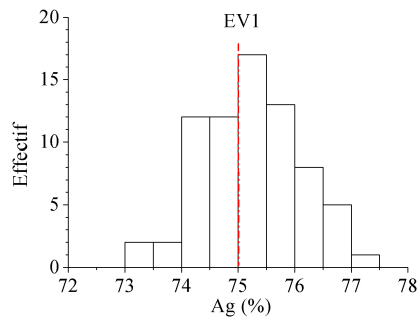
Les histogrammes de répartition présentés sur les Figures 39a à 39d montrent que les teneurs calculées forment une gaussienne centrée sur la teneur certifiée. Cela signifie que si un écart sensible peut occasionnellement apparaître, ces cas sont statistiquement peu fréquents ; la moyenne d'un nombre d'analyses significatif correspond de plus à la valeur attendue. La procédure utilisée pour le calcul des coefficients de réponse permet d'atténuer ces variabilités ponctuelles : lors d'une séance d'analyse, les coefficients de réponse de chaque élément sont moyennés pour chaque intervalle de temps.

***b. Les alliages argent-cuivre  
contenant les cinq éléments mineurs principaux***

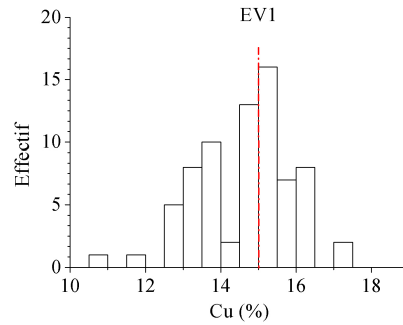
Les deux alliages EV1 et EV2, constitués d'une base argent-cuivre et contenant les cinq éléments mineurs qualifiés de « principaux » (Zn, Sn, Au, Pb, Bi) ont également fait l'objet d'analyses répétées par LA-ICP-MS afin d'en évaluer la reproductibilité. Les teneurs moyennes calculées pour chaque élément apparaissent dans le Tableau 10 et les résultats sont également présentés sous forme d'histogrammes de répartition (Figures 40a à 40g pour EV1 et 41a à 41g pour EV2).

		Ag	Cu	Zn	Sn	Au	Pb	Bi
<b>EV1</b>	Teneur attendue (%)	75,0	15,0	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
	Teneur moyenne calculée (%)	75,3	14,7	2,06	1,90	2,13	1,98	1,99
	Ecart-type relatif (%)	1,2	7,6	10,0	4,2	6,2	11,0	11,4
<b>EV2</b>	Teneur attendue (%)	45,0	45,0	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
	Teneur moyenne calculée (%)	46,8	43,3	1,98	1,95	1,97	2,06	2,02
	Ecart-type relatif (%)	3,2	4,6	10,8	6,3	7,5	13,2	14,6

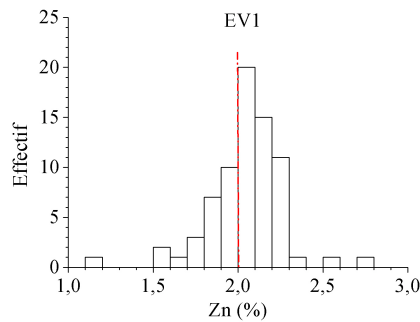
**Tableau 10** - Comparaison entre les teneurs moyennes déterminées par LA-ICP-MS pour les alliages de référence EV1 et EV2 et les teneurs supposées dans ces alliages.



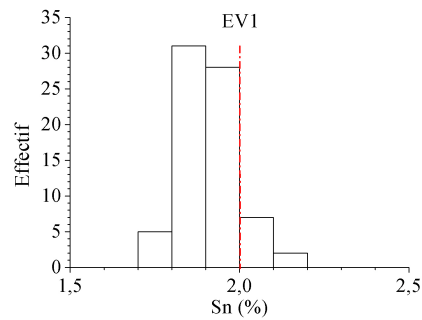
**40a.** Teneur supposée en Ag : 75,0 %



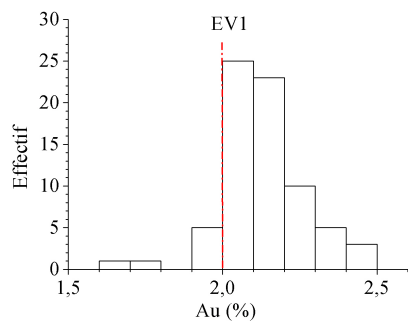
**40b.** Teneur supposée en Cu : 15,0 %



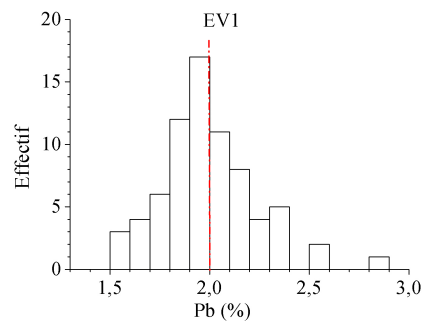
**40c.** Teneur supposée en Zn : 2,0 %



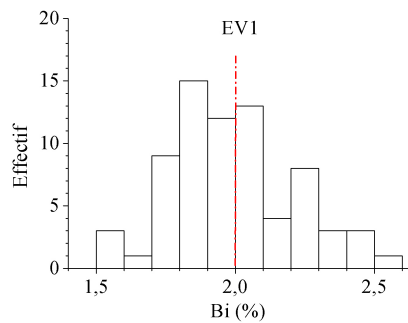
**40d.** Teneur supposée en Sn : 2,0 %



**40e.** Teneur supposée en Au : 2,0 %

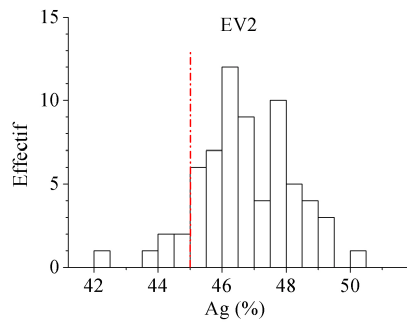


**40f.** Teneur supposée en Pb : 2,0 %

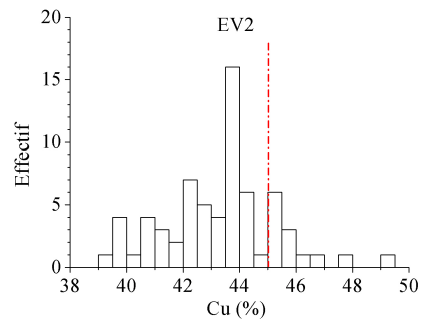


**40g.** Teneur supposée en Bi : 2,0 %

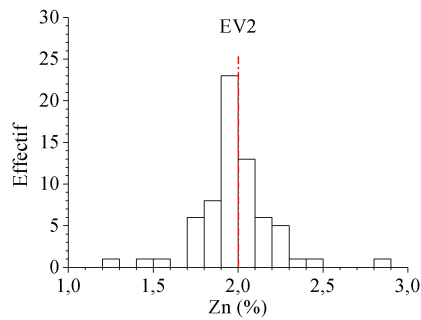
**Figures 40a à 40g** – Histogrammes de répartition des teneurs en argent, cuivre et cinq éléments mineurs principaux dans l'alliage de référence EV1 pour une série de 71 analyses.



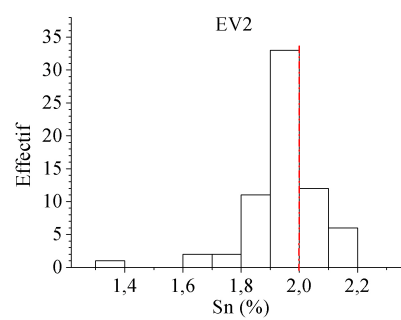
**41a.** Teneur supposée en Ag : 45,0 %



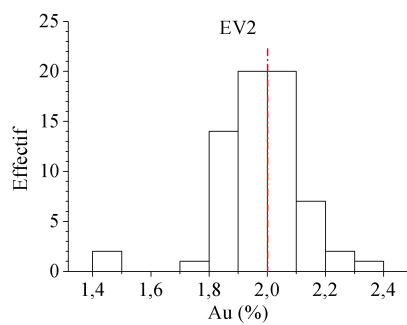
**41b.** Teneur supposée en Cu : 45,0 %



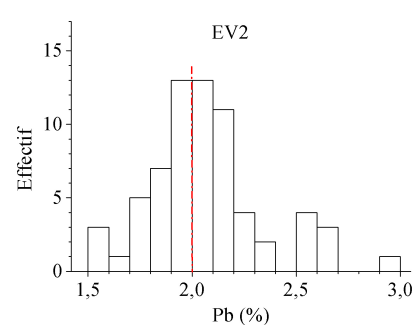
**41c.** Teneur supposée en Zn : 2,0 %



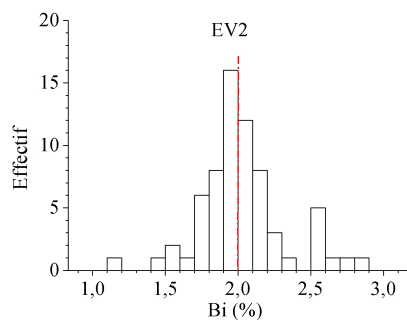
**41d.** Teneur supposée en Sn : 2,0 %



**41e.** Teneur supposée en Au : 2,0 %



**41f.** Teneur supposée en Pb : 2,0 %



**41g.** Teneur supposée en Bi : 2,0 %

**Figures 41a à 41g** - Histogrammes de répartition des teneurs en argent, cuivre et cinq éléments mineurs principaux dans l'alliage de référence EV2 pour une série de 67 analyses.



Les teneurs en argent et en cuivre obtenues pour l'alliage EV1 sont en bon accord avec les valeurs attendues. La répartition des teneurs calculées est centrée sur la teneur supposée, et l'amplitude de la dispersion des résultats est relativement faible : l'écart-type relatif calculé pour l'argent sur l'ensemble des valeurs est de 1 % environ.

Les teneurs en argent déterminées pour l'alliage EV2 en utilisant les autres alliages comme références sont en moyenne légèrement supérieures à la valeur supposée pour cet alliage (46,8 % en moyenne pour 45,0 %, soit un écart de 4 % relatifs). Les teneurs en cuivre sont au contraire légèrement inférieures à celles attendues. L'examen des Figures 40a et 41a, et des écarts-types relatifs présentés dans le Tableau 10, montre que la dispersion des valeurs est plus importante pour EV2 que pour EV1. L'analyse par ANRC de l'alliage EV2 semble confirmer le léger décalage des teneurs réelles en argent et en cuivre dans cet alliage par rapport aux teneurs attendues : les concentrations de ces deux éléments seraient respectivement de l'ordre de 47 % et 43 % au lieu des 45 % supposés pour l'argent comme pour le cuivre.

Les alliages de référence EV1 et EV2 sont les seuls, dans le protocole d'analyse des éléments majeurs, qui contiennent les cinq éléments mineurs principaux Zn, Sn, Au, Pb et Bi. Le calcul des teneurs de ces éléments dans ces deux alliages ne peut donc se faire que l'un par rapport à l'autre, et ne fera pas intervenir de matériaux de composition certifiée comme c'était le cas pour l'argent et le cuivre.

Les teneurs des cinq éléments mineurs principaux contenus dans les alliages EV1 et EV2 déterminées par LA-ICP-MS sont en bon accord avec les teneurs attendues : l'écart relatif entre la moyenne des teneurs calculées et les concentrations supposées est en effet au maximum égal à 7,5 % ; le plus souvent, il est de l'ordre de 2 à 3 % seulement. Des différences apparaissent néanmoins dans la dispersion des teneurs autour de la moyenne : les valeurs sont plus resserrées pour Au et Sn, tandis que la variabilité est plus importante pour Zn, Pb et Bi.

L'examen des résultats des analyses des alliages de référence les uns par rapport aux autres montre la cohérence de ces matériaux entre eux. La variabilité de composition des matériaux de référence permet d'envisager l'analyse d'alliages archéologiques de compositions très diverses.

## **2. L'analyse des alliages de référence utilisés dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces**

Les alliages de référence EV3 et EV4 contiennent les cinq éléments mineurs principaux Zn, Sn, Au, Pb et Bi, ainsi que As et Sb. Les teneurs des cinq éléments mineurs principaux dans ces deux alliages sont trop élevées pour permettre leur caractérisation dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces. La saturation du détecteur entraîne une sous-estimation dans la mesure de leur signal, ce qui induit une erreur dans le calcul des coefficients de réponse correspondants. Les écarts importants entre les teneurs réelles de ces éléments et les teneurs moyennes calculées lors de leur dosage par rapport aux autres matériaux de référence sont en effet de l'ordre de 25 % à 40 %, à l'exception de l'étain pour lequel les écarts sont de 10 % environ. Les coefficients de réponse calculés pour EV3 et EV4 ne sont donc pas utilisés pour l'analyse de Zn, Au, Pb et Bi.

Pour les deux autres éléments présents dans EV3 et EV4 (As et Sb), les écarts calculés entre teneur réelle de l'alliage et moyenne des valeurs calculées en considérant ces alliages comme des échantillons de composition inconnue sont inférieurs à 10 % relatifs. Les coefficients de réponse de As et Sb calculés pour EV3 et EV4 peuvent donc être utilisés pour le calcul des concentrations de ces deux éléments dans les monnaies anciennes. Le bon accord entre les coefficients de réponse calculés pour As et Sb pour les étalons EV3 et EV4 d'une part et RAgP3, RAgP7 et SF1A d'autre part confirme de plus la cohérence de l'ensemble de nos alliages de référence pour ces deux éléments. Cela est particulièrement intéressant car la comparaison des teneurs de ces deux éléments peut s'avérer utile pour distinguer des stocks de métaux différents pour des études de provenance des métaux constituant les monnaies.

Les trois autres alliages RAgP3, RAgP7 et SF1A contiennent chacun dix à quinze éléments-traces dont les teneurs, de l'ordre de quelques dizaines ou centaines de ppm, sont certifiées par les fabricants. Ces trois matériaux de référence proviennent toutefois de deux origines différentes ; il est donc nécessaire de s'assurer de la cohérence de ces alliages entre eux, ainsi qu'avec EV3 et EV4 pour les éléments communs.

Ces cinq alliages de référence ont été analysés les uns par rapport aux autres. Le Tableau 11 contient les résultats obtenus (teneur moyenne de chaque élément, écart-type relatif calculé sur l'ensemble des valeurs prises en compte et écart relatif par rapport à la teneur certifiée ou supposée) pour leur comparaison avec les valeurs attendues pour ces alliages.

	Elément	Fe	Ni	Zn	Cu	As	Se	Pd	Cd	Sn	Sb	Te	Pt	Au	Hg	Pb	Bi
EV3	Teneur certifiée	-	-	1000	18,20%	2000	-	-	-	1000	1000	-	-	2000	-	10000	1000
	Moyenne	-	-	667	nd	1859	-	-	-	900	923	-	-	1478	67	6335	753
	Ecart-type relatif	-	-	25%	-	12%	-	-	-	12%	8%	-	-	16%	140%	26%	22%
	Ecart relatif	-	-	33%	-	7%	-	-	-	10%	13%	-	-	26%	-	37%	25%
EV4	Teneur certifiée	-	-	2000	32,70%	1000	-	-	-	2000	500	-	-	5000	-	10000	2000
	Moyenne	-	-	1315	nd	977	-	-	-	1773	496	-	-	3219	73	6866	1375
	Ecart-type relatif	-	-	12%	-	11%	-	-	-	15%	13%	-	-	20%	141%	26%	33%
	Ecart relatif	-	-	34%	-	2%	-	-	-	11%	1%	-	-	36%	-	31%	31%
RAgP3	Teneur certifiée	88	24,4	28,7	29,9	-	-	25,3	-	27,2	26,7	26,1	26,7	36,4	-	26,7	24,5
	Moyenne	24	30	28	30	-	-	25	16	28	28	25	26	37	39	35	30
	Ecart-type relatif	106%	57%	9%	20%	-	-	4,3%	15%	5%	4%	4%	12%	6%	192%	24%	7%
	Ecart relatif	73%	23%	2%	1%	-	-	2,5%	-	4%	4%	4%	4%	7%	-	33%	23%
RAgP7	Teneur certifiée	17,4	181	209	209	-	-	193	-	192	185	181	187	216	-	194	231
	Moyenne	88	173	216	205	-	-	174	112	198	192	178	177	205	40	162	216
	Ecart-type relatif	40%	14,4%	8%	13%	-	-	5,9%	15%	6%	5%	3%	12%	7%	165%	13%	7%
	Ecart relatif	407%	5%	4%	2%	-	-	9,7%	-	3%	4%	2%	6%	5%	-	17%	7%
SF1A	Teneur certifiée	42,5	58,1	79,1	857	41,6	45	21	-	58,1	43,9	0	20,9	21,9	-	83,8	53,7
	Moyenne	39	54	84	849	43	46	24	15	4	55	47	25	26	47	93	51
	Ecart-type relatif	42%	19%	10%	15%	9%	24%	6,2%	14%	48%	8%	8%	15%	6%	266%	15%	9%
	Ecart relatif	7%	7%	6%	1%	4%	1%	12,7%	-	94%	26%	-	22%	20%	-	11%	5%

**Tableau 11** - Résultats des analyses des alliages de référence utilisés dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces les uns par rapport aux autres. Pour chaque alliage apparaissent la teneur supposée ou certifiée de chaque élément, la moyenne et l'écart-type relatif calculés sur l'ensemble des valeurs et l'écart relatif entre la moyenne et la teneur certifiée ou supposée. Sauf mention contraire, les teneurs sont exprimées en ppm.

D'une manière générale, les teneurs calculées pour chacun des trois alliages de composition certifiées sont en très bon accord avec les valeurs fournies par les fabricants : dans la plupart des cas, l'écart relatif entre les deux concentrations est inférieur à 10 % relatifs.

Des écarts de l'ordre de 20 % apparaissent pour Sb, Pt et Au dans SF1A. Il semble donc qu'un léger décalage existe pour ces éléments entre cet étalon et les deux autres alliages de composition certifiée. Les coefficients de réponse de Sb, Pt et Au déterminés pour SF1A ne sont donc pas utilisés pour le calcul des teneurs de ces éléments dans les monnaies anciennes.

Un écart très important a été relevé entre la teneur moyenne en étain calculée pour SF1A et la valeur certifiée pour cet élément dans cet alliage : la teneur calculée est de 4 ppm seulement alors que la valeur certifiée est de 58,1 ppm. Le dosage de l'étain dans EV3 et EV4 a confirmé les teneurs attendues pour ces deux alliages de référence de composition non certifiée, en s'appuyant pour l'étalonnage externe sur RAgP3 et RAgP7 ; il semble donc que la teneur certifiée pour SF1A ne soit pas juste. En conséquence, les valeurs des coefficients de réponse de l'alliage SF1A pour l'étain sont systématiquement éliminées pour le calcul des teneurs de cet élément dans les monnaies.

Une grande variabilité est observée pour le dosage du fer : l'écart-type relatif calculé sur l'ensemble des teneurs déterminées est supérieur à 40 % pour SF1A et RAgP7, et il excède 100 % pour RAgP3. Les écarts entre teneur moyenne calculée et teneur certifiée sont de plus considérables pour RAgP3 et RAgP7, tandis qu'une valeur cohérente a été obtenue pour SF1A. Il semble donc que le problème d'interférence de la recombinaison Ar-O<sup>+</sup> dont la masse est identique à celle du seul isotope du fer qu'il est possible de mesurer soit une source d'incertitude très importante pour le dosage du fer. La limite de détection de cet élément est très élevée du fait de l'existence de cette interférence, ce qui limite les cas pour lesquels il peut être dosé dans les échantillons. Les teneurs en fer calculées ne sont donc qu'indicatives d'un ordre de grandeur de la concentration de cet élément.

Des teneurs non négligeables en cadmium et en mercure ont également été mesurées dans la plupart des alliages de référence alors que ces deux éléments n'apparaissent pas dans la liste des constituants certifiés.

Des concentrations en cadmium de l'ordre de 15 ppm ont été calculées pour RAgP3 et SF1A, et de plus de 100 ppm pour RAgP7. L'écart-type relatif calculé sur l'ensemble des teneurs montre, pour chacun des alliages, que ces valeurs sont reproductibles d'une analyse à l'autre. Rien de tel n'a été mesuré pour EV3 et EV4. En outre, les teneurs en cadmium calculées dans les monnaies anciennes n'excèdent que très rarement la ppm. L'isotope du cadmium mesuré pour l'analyse de cet élément est celui de masse 110. Aucune interférence, de quelque type que ce soit, ne semble pouvoir influencer la mesure du signal du cadmium à cette masse. Il ne peut s'agir d'une mauvaise déconvolution du pic de l'argent de masse 109 : les teneurs de ces deux éléments ne semblent en effet pas être corrélées. En conséquence, il semble que RAgP3, RAgP7 et SF1A contiennent effectivement du cadmium à l'état de trace.

Des teneurs en mercure de l'ordre de quelques dizaines de ppm apparaissent également dans l'ensemble des matériaux de référence, alors qu'aucun d'eux n'est supposé contenir cet élément. Aucune interférence significative ne peut être identifiée pour la masse 202 qui est celle de l'isotope du mercure mesuré. Une explication possible est que l'utilisation du coefficient de réponse de l'or pour le calcul des teneurs en mercure entraîne une erreur systématique dans le dosage de cet élément. Cela suppose toutefois que les matériaux de référence contiennent chacun une très faible concentration en mercure. Contrairement au cadmium, les teneurs en mercure obtenues d'une séance d'analyse à l'autre sont très variables : les écarts-types relatifs calculés sur l'ensemble des valeurs sont supérieurs à 100 % pour l'ensemble des alliages de référence. Une répartition hétérogène de cet élément, ainsi qu'un faible rendement d'ionisation, peuvent être à l'origine de cette variabilité. Une autre explication peut être la pollution et le relargage du mercure : cet élément peut en effet se fixer sur les parties internes de l'appareillage lors d'une analyse et être libéré ultérieurement. Des teneurs en mercure non négligeables peuvent ainsi être mesurées pour des échantillons qui ne contiennent pas cet élément.

Enfin, une teneur de 47 ppm de tellure a été mesurée dans SF1A de manière reproductible, alors que cet élément n'apparaît pas dans la liste des constituants de cet alliage de référence. Le dosage du tellure dans RAgP3 et RAgP7, pour lesquels cet élément est certifié par le fabricant, est cohérent avec les valeurs attendues. Il semble donc que SF1A contienne effectivement environ 50 ppm de cet élément.

### III. Les analyses de coupes de monnaies

L'analyse des éléments majeurs dans les monnaies d'argent par LA-ICP-MS est effectuée en profils de concentration. Cette approche est supposée permettre la visualisation de l'évolution des teneurs de ces éléments à mesure que le laser pénètre l'échantillon. Il doit ainsi être possible de prendre en compte uniquement la partie de la courbe qui correspond à l'alliage sain pour le calcul des concentrations.

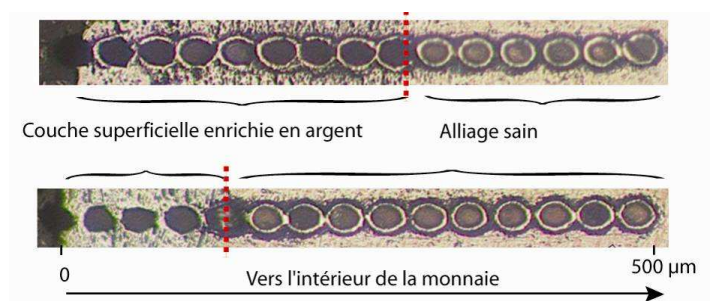
Afin de s'assurer de la validité de cette approche, des coupes de monnaies ont été étudiées. Un *corpus* d'échantillons de composition, d'époque et de géométrie différentes a ainsi été réuni pour une étude approfondie des variations de composition selon la profondeur. Ces données ont été comparées avec les profils effectués par LA-ICP-MS selon le protocole d'analyse des éléments majeurs défini.

#### 1. Les analyses par LA-ICP-MS

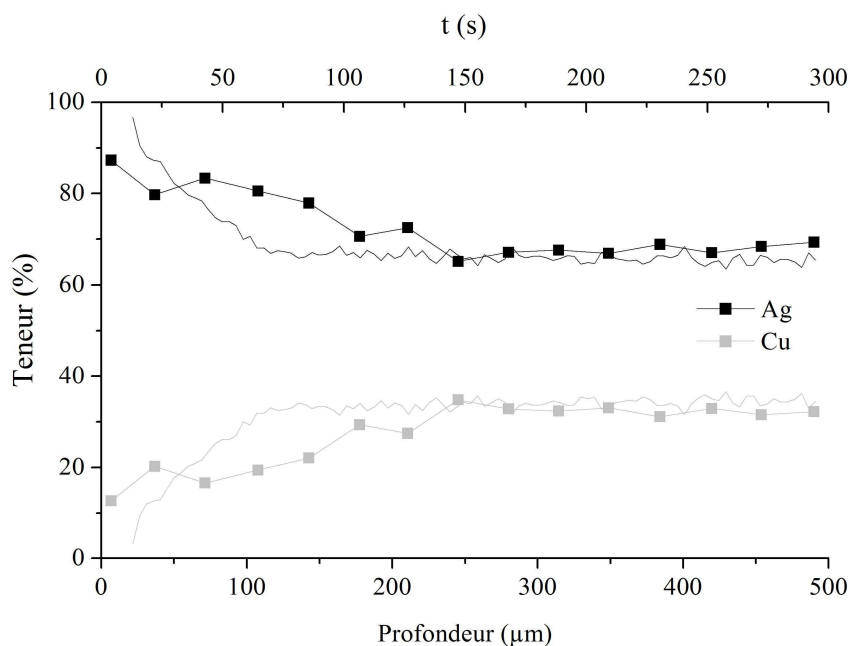
Les monnaies sectionnées pour en étudier la coupe ont été analysées en surface et en profondeur par spectrométrie de fluorescence X et par SEM-EDX. Cette première approche a permis de sélectionner les échantillons pour lesquels des écarts de composition importants apparaissent entre proche surface et intérieur. Une de ces monnaies s'est révélée particulièrement intéressante, et a été soumise à une étude approfondie par LA-ICP-MS.

Les trois analyses en profils de concentration par LA-ICP-MS effectuées sur cet échantillon ont révélé une répartition homogène de l'argent et du cuivre sous la couche perturbée ; de plus, la forme de ces profils laissait présager d'un enrichissement de surface non négligeable qu'il pourrait être possible d'étudier sur une coupe de cet échantillon.

Des analyses par LA-ICP-MS très brèves de 10 s à 10 Hz en mode Analogue ont été réalisées sur la section de cette monnaie pour doser l'argent et le cuivre. Le diamètre de chaque cratère d'ablation est d'environ 30  $\mu\text{m}$ . Quinze analyses successives ont été effectuées en deux endroits différents de chaque pièce. Chacune des deux séries d'analyses a été effectuée en progressant perpendiculairement au plan de la monnaie depuis la très proche surface vers l'intérieur (Figure 42). Une couche superficielle de 500  $\mu\text{m}$  environ a ainsi pu être étudiée.



**Figure 42** - Cratères d'ablation résultant d'analyses répétées effectuées sur la coupe d'une monnaie en progressant depuis la surface vers l'intérieur de l'échantillon.



**Figure 43** - Courbes d'évolution des teneurs en argent et en cuivre en analyse en temps réel (trait lisse) et en analyse ponctuelle sur la coupe en progressant selon la profondeur (points reliés).

La première observation qui peut être faite à l'examen de la Figure 42 est la différence d'épaisseur entre les couches d'enrichissement de surface mesurées sur des zones proches d'une même monnaie : la première image montre une couche de surface perturbée d'une épaisseur de l'ordre de 300 µm, alors qu'elle est de 150 µm sur la seconde. Il convient toutefois de rester prudent quant à l'interprétation de ces observations : l'épaisseur de la couche oxydée visible à la loupe binoculaire ne peut pas toujours être corrélée à celle mesurée lors de l'étude de coupes de monnaies par SEM-EDX.

Les résultats obtenus correspondant à la première image de la Figure 42 apparaissent sur la Figure 43 : chacune des teneurs en argent et en cuivre déterminée est matérialisée par un carré ; ces points sont représentés en fonction de la profondeur par rapport à la surface de la monnaie (échelle en abscisse en bas du

graphique). Un des profils de 300 s à 5 Hz dans une zone proche de la coupe est également présenté sur la Figure 43 (courbe lisse).

Les deux échelles de temps et de profondeur, si elles apparaissent sur le même graphique, ne peuvent être directement corrélées. La progression du laser dans la matière n'est pas linéaire, du moins durant la première partie de l'ablation laser. Les courbes correspondant aux deux approches étudiées ici sont présentées sur une même figure afin d'en faciliter la lecture.

Le profil de concentration présenté sur la Figure 43 montre un enrichissement de surface en argent d'une durée de l'ordre de 120 s. Les teneurs en argent et en cuivre se stabilisent par la suite. Les analyses ponctuelles sur la coupe de l'échantillon montrent pour leur part que la stabilisation des valeurs intervient pour une profondeur de 250  $\mu\text{m}$  environ. Cela ne signifie pas nécessairement qu'une durée de 120 s soit suffisante pour atteindre une profondeur de 250  $\mu\text{m}$ . Les analyses ont certes été réalisées sur des zones très proches de la monnaie étudiée, néanmoins la Figure 42 montre que l'épaisseur de la couche de surface perturbée semble pouvoir varier de manière importante à une faible échelle.

Le principal intérêt de la combinaison de ces deux approches est la comparaison des teneurs stabilisées après la couche de surface enrichie en argent. De ce point de vue, la corrélation entre les valeurs déterminées à partir des profils de concentration et à partir des analyses ponctuelles sur la coupe est très bonne. La teneur en argent déterminée pour l'analyse en temps réel effectuée comme défini dans le protocole d'analyse des éléments majeurs est de 65,9 % ; elle est de 67,6 % en moyenne pour les huit analyses ponctuelles effectuées entre 250  $\mu\text{m}$  et 500  $\mu\text{m}$  de profondeur sur la tranche polie.

Ces analyses effectuées sur la coupe d'un échantillon qui présente une couche d'enrichissement de surface non négligeable semblent donc valider l'approche proposée pour l'analyse des éléments majeurs : les profils de concentration par LA-ICP-MS pour les monnaies d'argent permettent de s'affranchir de la couche de surface perturbée pour caractériser l'alliage sain.

## **2. Comparaison des analyses par LA-ICP-MS avec d'autres méthodes**

Parmi les monnaies qu'il a été possible de sectionner pour en étudier la coupe, toutes ne se sont pas avérées aussi intéressantes que celle présentée dans le paragraphe précédent.

Dans la majorité des cas, la couche d'enrichissement de surface n'a pas semblé être suffisamment épaisse pour permettre d'étudier l'évolution des teneurs



en argent et en cuivre sur des coupes. Des échantillons ont toutefois révélé une différence non négligeable entre la teneur en argent calculée au début des profils par LA-ICP-MS et celle du palier de stabilité.

La teneur en argent déterminée par LA-ICP-MS a été comparée avec le résultat d'analyses par SEM-EDX sur la coupe polie de ces monnaies. Trois analyses ont été réalisées sur chaque coupe par cette dernière méthode. Des surfaces relativement larges et supposées représentatives de la composition globale de l'alliage sain ont été étudiées par SEM-EDX : les analyses ont porté sur des rectangles de 250x180 µm, soit une surface près de dix fois supérieure à celle des cratères d'ablation par LA-ICP-MS. Quatre échantillons ont ainsi été étudiés. Les résultats sont présentés dans le Tableau 12.

Référence	Profil LA-ICP-MS	SEM-EDX sur coupe
<b>XRAC2</b>	91,7%	93,2%
<b>XRAC5</b>	86,1%	85,0%
<b>1029b</b>	84,2%	86,1%
<b>1029a</b>	84,1%	82,3%

**Tableau 12** - Comparaison des teneurs en argent déduites des profils obtenus par LA-ICP-MS avec les teneurs déterminées par SEM-EDX sur la coupe de ces échantillons.

Les résultats obtenus selon les deux approches sont en bon accord : pour les quatre monnaies étudiées, les écarts entre les teneurs en argent déterminées par LA-ICP-MS et par SEM-EDX sur des coupes sont inférieurs à 3 % relatifs. L'analyse en profils de concentration par LA-ICP-MS semble donc être une approche adaptée pour déterminer le titre de l'alliage sain constituant les monnaies anciennes en argent.

## **IV. La représentativité des analyses**

### **1. L'analyse des éléments majeurs en profils de concentration**

L'une des principales innovations du protocole d'analyse des monnaies d'argent par LA-ICP-MS par rapport aux méthodes utilisées auparavant est le mode d'acquisition des données : la mesure du signal en temps réel, combinée à une pénétration progressive du laser dans l'alliage, permet la représentation de l'évolution de la composition de l'échantillon au fur et à mesure que le laser pénètre la matière. Des profils de concentration sont ainsi obtenus pour l'argent, le cuivre et les cinq éléments mineurs principaux susceptibles d'être analysés ainsi.

Le diamètre des cratères résultant de l'ablation laser a été défini afin de satisfaire à deux impératifs : la non destructivité, qui se traduit par un diamètre de

cratères suffisamment faible pour être invisible à l'œil nu ; et la représentativité du micro-prélèvement par rapport à l'alliage sain dans son ensemble. C'est la validation de cette dernière caractéristique qui est l'objet des paragraphes qui suivent.

Trois analyses en profils de concentration au moins sont effectuées sur chaque monnaie pour l'analyse des éléments majeurs. Nous avons vu plus haut que les analyses des alliages de référence utilisés pour l'étalonnage externe dans ce menu d'analyse permettent d'obtenir des valeurs justes et reproductibles. La variabilité des teneurs en argent devient certes plus importante quand la teneur de cet élément diminue, et certains des éléments mineurs dosés présentent une plus grande variabilité que d'autres ; il apparaît toutefois que la reproductibilité des analyses d'alliages modernes binaires argent-cuivre, purs ou contenant les cinq éléments mineurs principaux, et qui présentent une structure monophasée ou biphasée, est satisfaisante. La taille des micro-prélèvements effectués par LA-ICP-MS permet donc une analyse représentative de tels alliages. Mais qu'en est-il pour des monnaies anciennes ?

L'échelle à partir de laquelle une analyse ponctuelle est représentative de l'ensemble de l'échantillon peut en effet varier selon la composition de l'alliage, son mode de fabrication et les conditions de son enfouissement. La combinaison de ces différents paramètres peut influencer de manière sensible la structure interne des alliages qui constituent des pièces en apparence similaires. Il convient donc de s'assurer que l'analyse des monnaies anciennes à base d'argent par ICP-MS avec prélèvement par ablation laser permet une analyse représentative de ces échantillons, au même titre que celle des alliages modernes de même type.

Les résultats obtenus concernant la reproductibilité des analyses en profils de concentration par LA-ICP-MS sur de mêmes monnaies, pour l'argent et pour les cinq éléments mineurs principaux, sont présentés dans les paragraphes qui suivent. Le dosage des teneurs en cuivre n'a pas été reporté : les alliages étudiés sont binaires, les concentrations de cet élément sont donc sensiblement égales au complémentaire de celles de l'argent.

#### ***a. L'argent***

La reproductibilité et la représentativité des analyses par LA-ICP-MS ont tout d'abord été étudiées pour l'argent. Pour cela, les profils de concentration obtenus lors d'une même séance d'analyse et pour une même monnaie ont été superposés. Les teneurs en argent calculées à partir de chacun des profils ont été

comparées. Plusieurs exemples correspondant à des monnaies de gammes de titre diverses sont présentés dans les paragraphes qui suivent.

L'étude de la reproductibilité des analyses de monnaies d'argent par LA-ICP-MS est divisée en paragraphes correspondant à des teneurs en argent différentes définies d'après le diagramme de phase argent-cuivre : des exemples de monnaies contenant plus de 91,73 % d'argent, et pour lesquelles la structure de l'alliage est supposée monophasée, sont tout d'abord présentés ; viennent ensuite les titres compris entre 91,73 % et 71,59 % d'argent, soit des alliages biphasés dont la teneur en argent est supérieure à celle de la composition eutectique ; enfin, des exemples d'échantillons dont le titre déterminé est inférieur à celui de l'alliage argent-cuivre de composition eutectique sont exposés dans le troisième paragraphe.

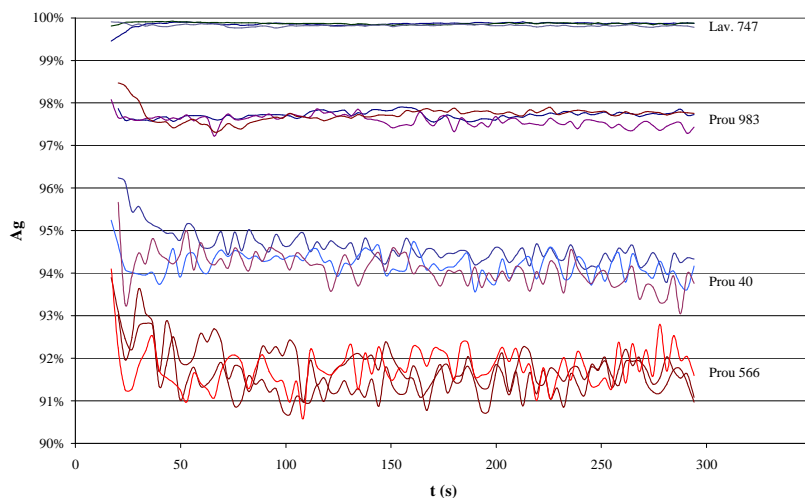
*i - Les titres d'argent supérieurs à 91,73 %*

La question de la représentativité des analyses effectuées à partir de micro-prélèvements par ablation laser doit en premier lieu être vérifiée pour les alliages de très bon titre. Les échantillons pour lesquels la structure de l'alliage argent-cuivre constituant la monnaie est supposée être monophasée, à savoir au-delà de 91,73 % d'argent, sont donc présentés dans ce premier paragraphe.

Plus de deux cents échantillons parmi l'ensemble de ceux analysés présentent une telle composition. Il s'agit donc d'une étude exhaustive pour ces alliages, d'autant plus que des monnaies d'époque et d'origine géographique différentes ont été considérées : des deniers carolingiens principalement, mais aussi des monnaies françaises du XIII<sup>e</sup> siècle, des dirhams arabes des VIII<sup>e</sup> et XIII<sup>e</sup> siècles, ainsi que des exemplaires sassanides.

Les résultats obtenus pour quatre monnaies sont présentés ici à titre d'exemples. Une cinquième pièce a également été prise en compte afin de refléter l'ensemble des cas de figure susceptibles de se présenter.

Les trois profils obtenus pour un même échantillon ont été superposés sur un même graphique pour quatre monnaies d'un titre supérieur à 91,73 % (Figure 44). Les teneurs moyennes obtenues à partir de chacune des trois analyses ont également été étudiées (Tableau 13).



**Figure 44** - Superposition des trois profils de concentration de l'argent obtenus pour quatre monnaies anciennes de titre supérieur à 91,73 %.

Référence		Teneur en argent	Ecart-type relatif calculé sur l'ensemble des valeurs du profil
<b>Lav.747</b>	Profil 1	99,86%	0,02%
	Profil 2	99,86%	0,02%
	Profil 3	99,82%	0,03%
	moyenne	<b>99,85%</b>	0,02%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>0,02%</b>	
<b>Prou 983</b>	Profil 1	97,72%	0,10%
	Profil 2	97,59%	0,17%
	Profil 3	97,70%	0,14%
	moyenne	<b>97,67%</b>	0,14%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>0,07%</b>	
<b>Prou 40</b>	Profil 1	94,58%	0,37%
	Profil 2	94,26%	0,38%
	Profil 3	94,16%	0,46%
	moyenne	<b>94,33%</b>	0,40%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>0,23%</b>	
<b>Prou 566</b>	Profil 1	91,69%	0,71%
	Profil 2	91,77%	0,62%
	Profil 3	91,79%	0,68%
	moyenne	<b>91,75%</b>	0,67%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>0,10%</b>	

**Tableau 13** - Résultats obtenus pour l'argent à partir de profils de concentration pour quatre monnaies d'un titre supérieur à 91,73 %.

Pour chacun des échantillons étudiés, les trois profils sont cohérents et présentent un plateau de stabilité suffisamment long pour permettre le calcul d'une teneur en argent à partir de chacun d'entre eux.

Un léger enrichissement de la surface en argent peut être décelé sur les profils correspondant à la monnaie de plus faible titre pour ce premier groupe (Figure 44) : durant les premières secondes de l'analyse, la teneur en argent calculée pour Prou 566 est de près de 94 % ; soixante secondes environ sont nécessaires pour que les profils se stabilisent et atteignent une valeur similaire, de l'ordre de 91,8 %.

La superposition des trois profils correspondant à quatre monnaies d'un titre d'argent élevé semble montrer que l'incertitude sur la teneur en argent augmente quand cette valeur diminue. L'amplitude des fluctuations est en effet visiblement plus importante sur la Figure 44 pour Prou 566 et Prou 40, alors que Lav. 747 et Prou 983 présentent des profils plus linéaires. Une telle variabilité de l'amplitude des valeurs des teneurs en argent calculées pour des monnaies de tels titres peut être surprenante : si l'on se réfère au diagramme de phase argent-cuivre, les quatre monnaies présentées dans ce paragraphe sont supposées être constituées d'un alliage monophasé. Une structure identique constituée d'une phase unique laissait donc présager d'une répartition parfaitement homogène pour l'ensemble des monnaies d'un titre supérieur à 91,73 % d'argent. La variabilité des teneurs en argent sur les profils présentés peut s'expliquer par l'incertitude de la mesure du signal instantané. Cette incertitude est de  $\sqrt{N}/N$  pour la mesure de N coups. A l'incertitude de la mesure du signal de l'argent pour l'échantillon s'ajoute celle pour les alliages de référence utilisés pour l'étalonnage externe. L'incertitude relative calculée ainsi augmente quand les valeurs de signal deviennent plus faibles. Les valeurs de signal brut de l'argent mesurées pour des monnaies anciennes sont globalement corrélées à la teneur de cet élément : d'une manière générale, le nombre de coups mesurés est plus faible quand la teneur diminue. Cela signifie que l'incertitude sur la mesure du signal est plus élevée pour les faibles teneurs. C'est vraisemblablement à l'incertitude de la mesure du signal brut que doivent être imputées les variabilités de teneurs observées pour certains des échantillons présentés sur la Figure 44.

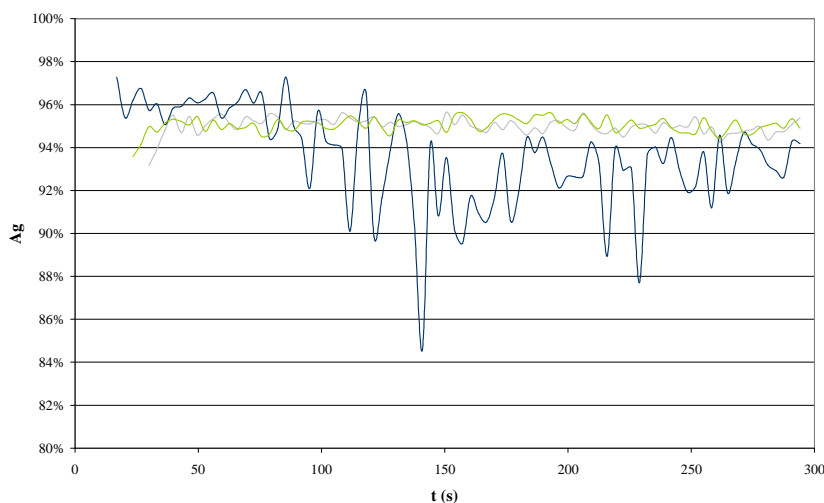
La comparaison des teneurs en argent déterminées à partir de chacun des trois profils montre une excellente reproductibilité de l'analyse par LA-ICP-MS (Tableau 13). L'écart absolu entre les trois teneurs en argent déterminées pour chaque profil est inférieur à 0,5 % pour l'ensemble des quatre monnaies étudiées. Les variations observées sur les profils de concentration semblent donc être liées à

la résolution en profondeur de l'analyse en temps réel par LA-ICP-MS : la représentation du signal correspondant à une moyenne calculée sur deux secondes environ met en évidence des hétérogénéités ponctuelles au sein de certains alliages monétaires de très bon titre. Les teneurs moyennes montrent toutefois que les profils effectués sur un même échantillon sont centrés sur une valeur identique.

La cohérence des trois analyses effectuées pour les quatre exemples présentés, et pour l'ensemble des monnaies d'un titre supérieur à 91,73 % d'argent analysées, est d'une manière générale excellente. Les valeurs d'écart-type relatif calculées à partir des valeurs moyennées pour l'obtention de la teneur en argent pour chaque profil confirment cette observation : elles sont inférieures à 1% relatif pour les quatre monnaies étudiées.

La reproductibilité des teneurs en argent déterminées à partir des profils de concentration obtenus par LA-ICP-MS montre la représentativité des analyses effectuées ainsi. Le diamètre des cratères d'ablation de 80  $\mu\text{m}$  est donc adapté pour l'analyse des alliages d'un titre d'argent supérieur à 91,73 %.

Il peut arriver que l'un des profils de concentration de l'argent obtenu pour une monnaie soit trop fluctuant pour permettre le calcul d'une teneur à partir de celui-ci. La Figure 45 présente un exemple de monnaie pour laquelle un des profils ne présente pas de palier de stabilité qui permette de calculer une teneur en argent, tandis que les deux autres sont cohérents. Il s'agit vraisemblablement d'une hétérogénéité ponctuelle au sein d'un alliage globalement homogène. La teneur en argent pour une monnaie comme celle-ci est donc déterminée à partir des deux profils de concentration linéaires. Une quatrième analyse peut également être effectuée pour confirmer la valeur déduite des deux premiers profils linéaires.



**Figure 45** - Profils de concentration de l'argent obtenus par LA-ICP-MS pour l'échantillon Prou 630.

De tels cas sont toutefois particulièrement rares pour les monnaies de très bon titre : parmi les 207 monnaies analysées dont le titre d'argent est supérieur à 91,73 %, seules dix-huit d'entre elles ont présenté un profil trop fluctuant pour permettre le calcul d'une teneur, soit moins de 9 % des échantillons. Dans la plupart des cas, les trois profils effectués sur un même échantillon sont linéaires et centrés sur une même teneur pour cette gamme de composition.

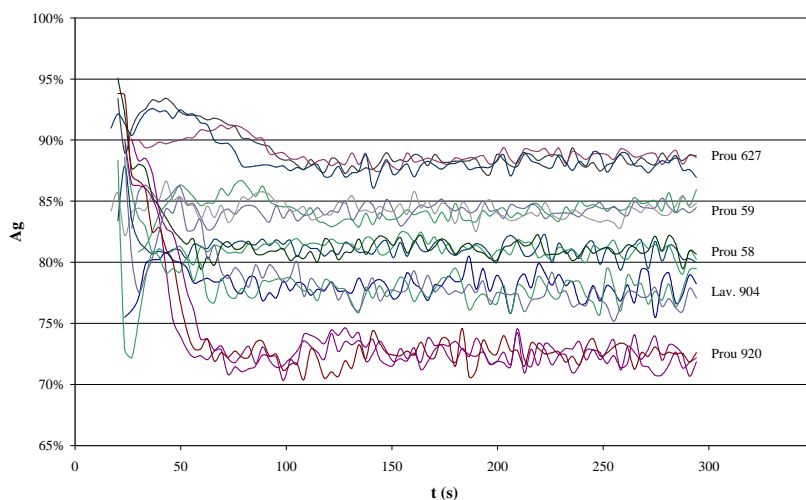
Certains *corpus* monétaires dont le titre est invariablement supérieur à 95 % d'argent ne présentent pas d'enrichissement de surface visible. Les profils de concentration de tels échantillons sont linéaires tout au long des 300 s d'analyse. Il peut donc être envisageable de réduire la durée de l'analyse à 200 s pour ces *corpus*. L'approche en profils de concentration doit toutefois être conservée afin de s'assurer de la structure homogène des alliages monétaires.

*ii - Les titres d'argent compris entre 71,59 % et 91,73 %*

La seconde gamme de teneurs en argent étudiée des points de vue de la reproductibilité et de la représentativité des analyses s'étend de 71,59 % à 91,73 %. Il s'agit, d'après le diagramme de phase argent-cuivre, de compositions comprises entre celle de l'alliage eutectique et celle à partir de laquelle la structure est monophasée. Cent soixante-cinq pièces parmi l'ensemble de celles analysées dans le cadre de cette thèse sont dans ce cas.

Les profils obtenus pour cinq monnaies sont présentés à titre d'exemple, ainsi que les teneurs en argent calculées à partir de ces profils. La Figure 46 et le Tableau 14 montrent une bonne reproductibilité des analyses en profils de concentration pour l'argent ainsi qu'une bonne cohérence entre les valeurs calculées à partir de ces profils. Pour chacune des quatre monnaies présentées, l'écart entre les teneurs en argent calculées à partir des trois profils est inférieur à 1 % absolu. Les valeurs d'écart-type relatif calculé à partir de l'ensemble des valeurs utilisées pour déterminer la teneur moyenne pour chaque profil sont de l'ordre de 1 % pour toutes les monnaies présentées, à l'exception de Prou 920 pour laquelle cette valeur est de 2 % environ.

D'une manière générale, l'analyse de l'argent par LA-ICP-MS en profils de concentration est reproductible et semble donc représentative pour cette gamme de teneurs en argent.



**Figure 46** - Superposition des trois profils de concentration de l'argent obtenus pour cinq monnaies anciennes de titre compris entre 71,59 % et 91,73 %.

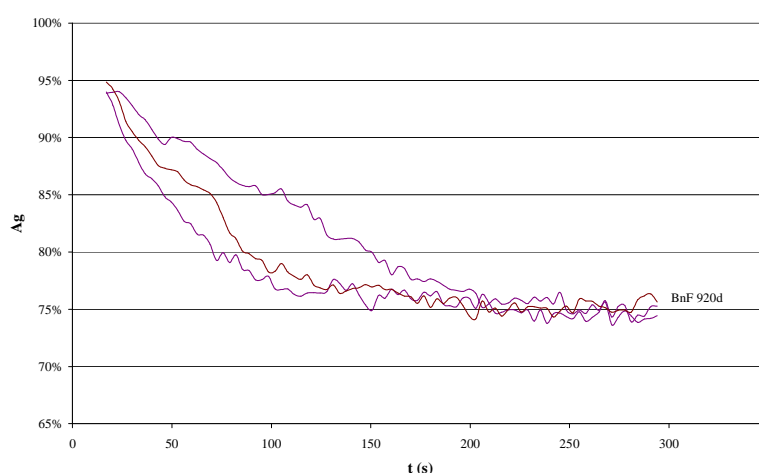
Référence		Teneur en argent	Ecart-type relatif calculé sur l'ensemble des valeurs du profil
<b>Prou 627</b>	Profil 1	88,30%	0,87%
	Profil 2	88,64%	0,80%
	Profil 3	88,06%	1,05%
	moyenne	<b>88,33%</b>	0,91%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>0,33%</b>	
<b>Prou 59</b>	Profil 1	83,99%	1,05%
	Profil 2	84,29%	0,97%
	Profil 3	84,12%	1,32%
	moyenne	<b>84,13%</b>	1,11%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>0,18%</b>	
<b>Prou 58</b>	Profil 1	80,94%	1,36%
	Profil 2	81,14%	1,19%
	Profil 3	81,11%	1,28%
	moyenne	<b>81,06%</b>	1,28%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>0,13%</b>	
<b>Lav. 904</b>	Profil 1	78,01 %	1,73 %
	Profil 2	77,65 %	1,65 %
	Profil 3	77,44 %	1,85 %
	moyenne	77,72 %	1,74 %
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	0,41 %	
<b>Prou 920</b>	Profil 1	72,29%	2,18%
	Profil 2	72,73%	2,09%
	Profil 3	72,50%	2,18%
	moyenne	72,51%	2,15%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>0,15%</b>	

**Tableau 14** - Résultats obtenus pour l'argent à partir de profils de concentration pour cinq monnaies d'un titre compris entre 71,59 % et 91,73 %.



Des écarts importants apparaissent pour certaines monnaies entre la teneur en argent calculée durant les premières secondes de l'analyse et celle du palier de stabilité obtenu par la suite. Cela est particulièrement visible parmi les exemples présentés pour l'échantillon Prou 920, pour lequel la teneur calculée pour l'argent décroît pour chacun des trois profils de près de 95 % à 72 % environ (Figure 46). La différence de teneur en argent entre l'alliage sain et la proche surface est ainsi supérieure à 20 % pour cette monnaie.

Les analyses de monnaies anciennes réalisées par LA-ICP-MS confirment le caractère imprévisible du phénomène d'enrichissement de la surface en argent : l'analyse en profils de concentration a permis de mettre en évidence que des monnaies dont la composition interne est identique peuvent présenter ou non des différences de teneurs très importantes entre les premières secondes de l'analyse et le palier de stabilité.



**Figure 47** - Superposition des trois profils de concentration de l'argent obtenus pour l'échantillon BnF 920d.

Un échantillon parmi ceux qui s'intègrent dans la gamme de compositions considérées dans ce paragraphe a révélé un enrichissement de surface particulièrement conséquent : il s'agit de BnF 920d. Près de 200 s sont en effet nécessaires pour atteindre un palier de stabilité et donc obtenir des teneurs correspondant à l'alliage sain (Figure 47). Il est remarquable, pour cet échantillon comme pour ceux présentés plus haut, que les trois profils de concentration se stabilisent à des valeurs très proches. La durée d'ablation nécessaire pour atteindre cette stabilisation est de plus similaire malgré un enrichissement de surface qui semble conséquent. La reproductibilité de l'analyse ponctuelle par LA-ICP-MS

semble donc se vérifier également pour des monnaies dont la composition en surface a été modifiée sur une épaisseur visiblement importante.

La profondeur atteinte par le laser après 200 s d'ablation à 5 Hz n'est pas connue avec précision. Un calcul effectué en suivant la modélisation proposée dans le chapitre précédent donne une valeur de 278  $\mu\text{m}$ . La valeur réelle de profondeur peut donc être de 250  $\mu\text{m}$  à 300  $\mu\text{m}$  environ. Si cette estimation est conforme à la réalité, la fraction correspondant à l'alliage sain par rapport à l'alliage constituant la monnaie dans sa totalité doit être relativement faible : BnF 920d est en effet une monnaie carolingienne, dont l'épaisseur est inférieure à 1 mm. Un enrichissement de surface de l'ordre de 250  $\mu\text{m}$  sur chaque face représente donc au moins 50 % de l'ensemble de la monnaie.

L'analyse de cet échantillon par ANRC a révélé un titre d'argent moyen de 82,5 %. Cette valeur est nettement supérieure à celle déduite des profils de concentration effectués par LA-ICP-MS qui est de 75,6 %. Il semble donc que l'enrichissement en argent de la surface de BnF 920d affecte de manière non négligeable l'analyse globale par ANRC. Le dosage de l'argent par LA-ICP-MS en profils de concentration, qui permet la visualisation de l'enrichissement de surface, constitue donc une approche privilégiée pour de tels échantillons par rapport aux méthodes d'analyse de surface ou globale.

L'enrichissement de surface très important mis en évidence pour BnF 920d lors de l'analyse des éléments majeurs doit être pris en compte pour l'analyse des éléments mineurs et traces : pour de tels échantillons, il convient d'ajuster la durée de pré-ablation pour l'analyse de ces éléments afin de les caractériser dans l'alliage sain et non dans la couche superficielle perturbée.

Les cas pour lesquels les analyses en profils de concentration ont révélé une hétérogénéité ponctuelle des alliages monétaires sont plus fréquents pour les échantillons de ce groupe que pour le précédent : ce sont ainsi 50 monnaies, parmi les 165 analysées dont le titre est compris entre 71,59 % et 91,73 % d'argent, pour lesquelles un des profils au moins a présenté des fluctuations importantes. Le taux d'échantillons pour lesquels une analyse supplémentaire s'est avérée nécessaire s'élève donc à 30 % pour ces monnaies, alors qu'il était de 9 % pour le groupe constitué des exemplaires de titre supérieur à 91,73 %.

Malgré cette quatrième analyse, les résultats obtenus par LA-ICP-MS se sont révélés inexploitable pour deux échantillons du fait de fluctuations importantes des profils de concentration. Il pourrait s'agir d'une hétérogénéité

importante de l'alliage de départ, ou d'une corrosion très prononcée qui affecterait l'ensemble de l'échantillon. Cela reste néanmoins tout à fait acceptable par rapport à l'ensemble des monnaies analysées.

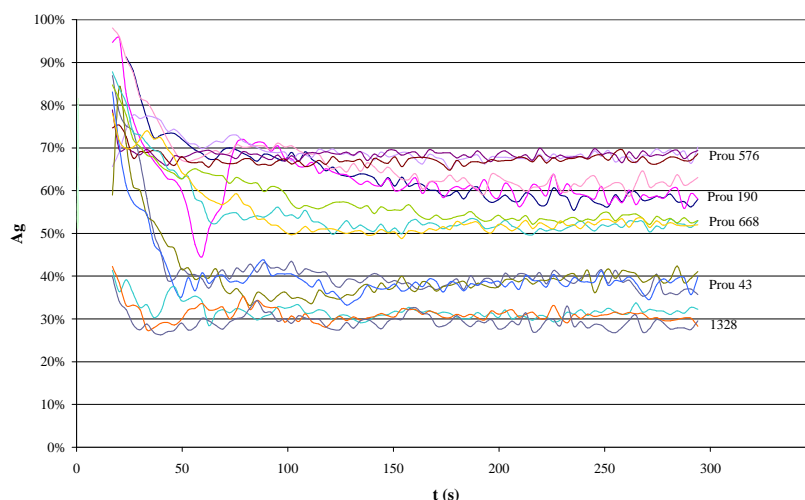
D'une manière générale, l'analyse de l'argent par LA-ICP-MS pour les monnaies de titre compris entre 91,73 % et 71,59 % est représentative de l'alliage sain dans son ensemble.

### *iii - Les titres d'argent inférieurs à 71,59 %*

Les monnaies de titre inférieur à 71,59 % n'ont pas été étudiées de manière exhaustive comme celles contenant davantage d'argent. Seules 52 pièces de ce type ont été analysées, soit 12 % de l'ensemble des échantillons caractérisés par LA-ICP-MS dans le cadre de cette thèse.

L'interprétation des résultats obtenus par LA-ICP-MS quant à la représentativité des analyses sur de tels échantillons n'est donc qu'indicative. L'examen des profils obtenus pour ces monnaies permet toutefois d'estimer la pertinence de l'application du protocole développé pour les alliages de titre relativement faible.

Les profils de concentration présentés à titre d'exemple sur la Figure 48, et les valeurs correspondantes regroupées dans le Tableau 15, montrent que les analyses par LA-ICP-MS peuvent être reproductibles pour des monnaies de titre relativement faible.



**Figure 48** - Superposition des trois profils de concentration de l'argent obtenus pour cinq monnaies anciennes de titre inférieur à 71,59 %.

Référence		Teneur en argent	Ecart-type relatif calculé sur l'ensemble des valeurs du profil
<b>Prou 576</b>	Profil 1	67,87%	1,84%
	Profil 2	68,38%	1,74%
	Profil 3	66,98%	2,00%
	moyenne	<b>67,74%</b>	1,86%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>1,05%</b>	
<b>Prou 190</b>	Profil 1	60,33%	5,92%
	Profil 2	59,71%	5,05%
	Profil 3	62,93%	4,99%
	moyenne	<b>60,99%</b>	5,32%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>2,80%</b>	
<b>Prou 668</b>	Profil 1	52,06%	3,36%
	Profil 2	54,11%	2,64%
	Profil 3	51,43%	2,93%
	moyenne	<b>52,53%</b>	2,98%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>2,67%</b>	
<b>Prou 43</b>	Profil 1	39,67%	5,75%
	Profil 2	38,44%	6,27%
	Profil 3	38,35%	6,40%
	moyenne	<b>38,82%</b>	6,14%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>1,90%</b>	
<b>1328</b>	Profil 1	31,33%	4,75%
	Profil 2	31,14%	4,45%
	Profil 3	29,39%	7,51%
	moyenne	<b>30,62%</b>	5,57%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>3,49%</b>	

**Tableau 15** - Résultats obtenus pour l'argent à partir de profils de concentration pour cinq monnaies d'un titre inférieur à 71,59 %.

Les cinq échantillons dont les profils de concentration sont présentés sur la Figure 48 comptent parmi les cas les plus favorables pour les pièces de titre inférieur à 71,59 %. Ces exemples démontrent néanmoins que les trois analyses effectuées à partir de micro-prélèvements par LA-ICP-MS peuvent être reproductibles pour des monnaies contenant de 30 % à 70 % d'argent environ. Cette approche est donc adaptée pour les échantillons de cette gamme de composition.

Les profils de concentration obtenus pour les monnaies contenant moins de 71,59 % d'argent peuvent révéler des différences de composition entre proche surface et intérieur, ou au contraire des écarts relativement faibles.

Parmi les monnaies présentées à titre d'exemple sur la Figure 48, il est possible d'observer un enrichissement de surface peu marqué (1328) ou au contraire très prononcé (Prou 43). Il semble donc qu'une couche perturbée d'épaisseur importante ne soit pas systématique, même pour les monnaies de titre faible. Les analyses effectuées sur ces échantillons confirment le caractère imprévisible de l'enrichissement de surface, au même titre que pour les alliages monétaires contenant davantage d'argent. De plus, l'écart-type calculé sur l'ensemble des teneurs en argent utilisées pour obtenir une valeur unique pour chaque profil reste raisonnable pour les échantillons qui présentent un palier de stabilité.

Les exemples présentés plus haut correspondant à des monnaies d'un titre inférieur à 71,59 % ont montré qu'un prélèvement microscopique ponctuel peut permettre une analyse représentative pour des échantillons de ce type. Ce sont cependant ces monnaies, parmi l'ensemble de celles analysées, pour lesquelles les cas de profils fluctuants se sont révélés les plus fréquents.

Parmi les 52 monnaies analysées contenant moins de 71,59 % d'argent, seules 22 ont permis d'obtenir trois profils présentant un palier de stabilité. C'est donc dans la majorité des cas qu'un des profils au moins n'a pas pu être exploité. C'est également parmi ces monnaies que les cas pour lesquels aucun profil stable n'a été obtenu ont été les plus fréquents : 9 des 52 échantillons ont en effet présenté trois profils inexploitable, soit plus de 15 % du total de ce groupe. Les procédés de fabrication des monnaies, ainsi que la corrosion résultant des conditions d'enfouissement peuvent influencer la structure interne des alliages, et donc être à l'origine des variations de teneurs observées sur les profils.

Un nombre d'analyses plus conséquent, et portant sur des *corpus* monétaires de titres et d'époques divers, semble nécessaire afin d'évaluer la pertinence de l'analyse par LA-ICP-MS des monnaies d'argent de titre faible. Les premières analyses montrent néanmoins qu'une teneur en argent peut être définie pour ces monnaies dans la majorité des cas. La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus par ANRC montre que les valeurs déterminées par les deux méthodes sont cohérentes d'une manière générale.

#### ***b. Les cinq éléments mineurs principaux***

Les cinq éléments mineurs principaux (Zn, Sn, Au, Pb et Bi) sont susceptibles d'être dosés en profils de concentration. La reproductibilité de leur analyse selon cette approche a donc été étudiée pour les cas où leur teneur s'est

avérée supérieure à la limite de détection dans le menu d'analyse des éléments majeurs.

#### *i - Le zinc*

Les teneurs en zinc dans les monnaies d'argent sont, d'une manière générale, inférieures à la limite de détection calculée pour le menu d'analyse des éléments majeurs (1200 ppm). Il arrive toutefois que certaines pièces contiennent des teneurs en zinc plus élevées, qui peuvent atteindre le pourcent ou plusieurs pourcents. Les Figures 49 et 50 ainsi que le Tableau 16 présentent des exemples de résultats obtenus dans de tels cas.

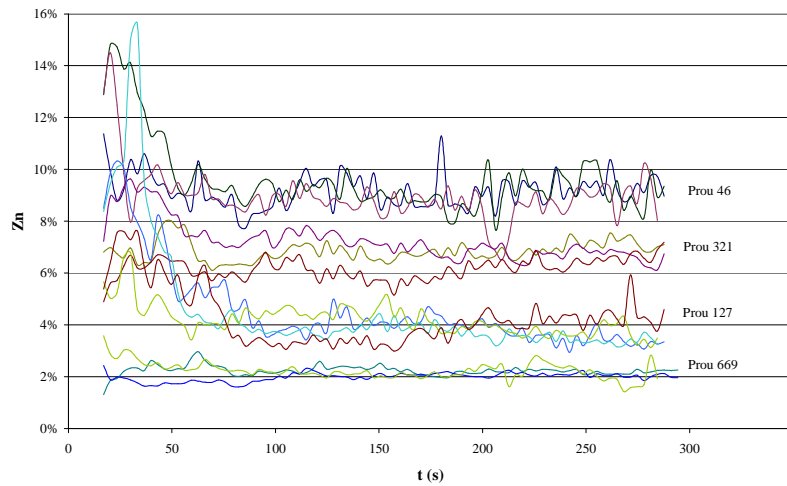
Les profils de concentration présentés sur la Figure 49 correspondent à quatre des monnaies les plus riches en zinc parmi toutes celles analysées par LA-ICP-MS. Les teneurs calculées à partir de ces profils sont comprises entre 2 % et 10 % pour cet élément.

Les profils de concentration obtenus pour ces quatre monnaies sont relativement linéaires et superposables. Ils reflètent donc une répartition homogène de cet élément au sein des alliages. L'analyse du zinc en profils de concentration pour les teneurs en zinc très élevées semble donc être une approche adaptée.

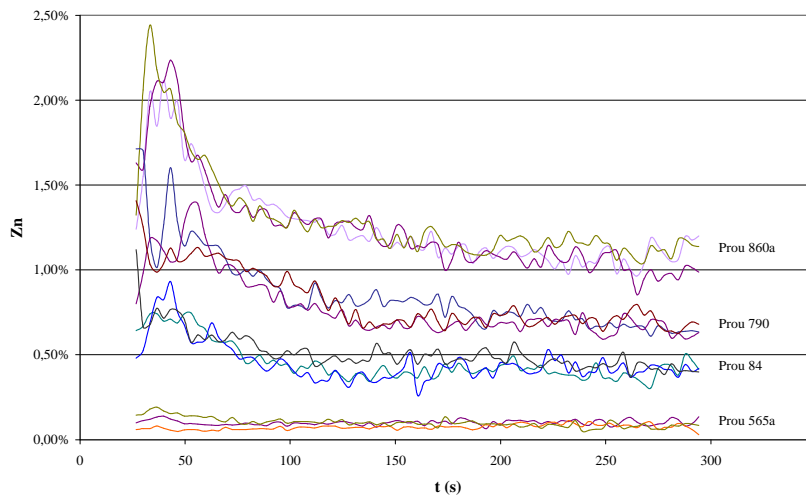
Des fluctuations ponctuelles sont visibles sur les courbes, en particulier pour les trois monnaies les plus riches en zinc parmi les quatre présentées sur la Figure 49. Ces variations de teneurs sont vraisemblablement liées au caractère biphasé de ces alliages monétaires ; les éléments mineurs présents à des teneurs importantes, comme c'est le cas pour le zinc ici, sont répartis d'une manière différente entre les deux phases constituant l'alliage selon leur miscibilité avec l'argent et le cuivre.

La comparaison entre les teneurs calculées à partir de chacun des trois profils montre une bonne cohérence des valeurs et confirme la représentativité des analyses effectuées à partir de micro-prélèvements par ICP-MS suite à une ablation laser pour les très fortes teneurs en zinc (Tableau 16).

La Figure 50 présente des exemples de profils de concentration du zinc pour des teneurs moins fortes que les échantillons précédents, mais toutefois relativement élevées. Ces profils révèlent une répartition homogène de cet élément : les paliers de stabilité sont identiques pour les trois courbes, et les teneurs calculées pour un même échantillon sont en bon accord (Tableau 16).



**Figure 49** - Superposition des trois profils de concentration du zinc obtenus pour quatre monnaies anciennes contenant plus de 2 % de cet élément.



**Figure 50** - Superposition des trois profils de concentration du zinc obtenus pour quatre monnaies anciennes contenant moins de 2 % de cet élément.

Référence		Teneur en zinc	Ecart-type relatif calculé sur l'ensemble des valeurs du profil
<b>Prou 46</b>	Profil 1	9,13%	10,3%
	Profil 2	9,02%	9,0%
	Profil 3	8,61%	10,9%
	moyenne	<b>8,92%</b>	10,1%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>3,07%</b>	
<b>Prou 321</b>	Profil 1	6,84%	5,6%
	Profil 2	6,83%	5,5%
	Profil 3	6,02%	7,6%
	moyenne	<b>6,56%</b>	6,2%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>7,17%</b>	
<b>Prou 669</b>	Profil 1	2,24%	8,9%
	Profil 2	2,01%	8,3%
	Profil 3	2,18%	11,6%
	moyenne	<b>2,14%</b>	9,6%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>5,57%</b>	
<b>Prou 127</b>	Profil 1	3,94%	13,6%
	Profil 2	3,88%	12,6%
	Profil 3	2,70%	10,0%
	Profil 4	4,13%	12,1%
	moyenne	<b>3,66%</b>	12,1%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>19,09%</b>	
<b>Prou 860a</b>	Profil 1	1,08%	7,1%
	Profil 2	1,07%	9,2%
	Profil 3	1,15%	6,5%
	moyenne	<b>1,10%</b>	7,6%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>3,96%</b>	
<b>Prou 790</b>	Profil 1	0,68%	9,1%
	Profil 2	0,75%	11,4%
	Profil 3	0,71%	7,9%
	moyenne	<b>0,71%</b>	9,5%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>4,92%</b>	
<b>Prou 84</b>	Profil 1	0,40%	13,2%
	Profil 2	0,40%	16,9%
	Profil 3	0,47%	13,0%
	moyenne	<b>0,42%</b>	14,4%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>9,55%</b>	
<b>Prou 565a</b>	Profil 1	984 ppm	19,9%
	Profil 2	757 ppm	25,0%
	Profil 3	965 ppm	27,6%
	moyenne	<b>902 ppm</b>	24,2%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>12,37%</b>	

**Tableau 16** - Résultats obtenus pour le zinc à partir de profils de concentration pour huit monnaies anciennes.

L'examen des courbes d'évolution des teneurs en zinc présentées sur les Figures 49 et 50 montre un enrichissement de surface visible sur la plupart de ces échantillons : une décroissance progressive des teneurs calculées est en effet visible sur ces courbes, suivie d'une stabilisation autour d'une même valeur.



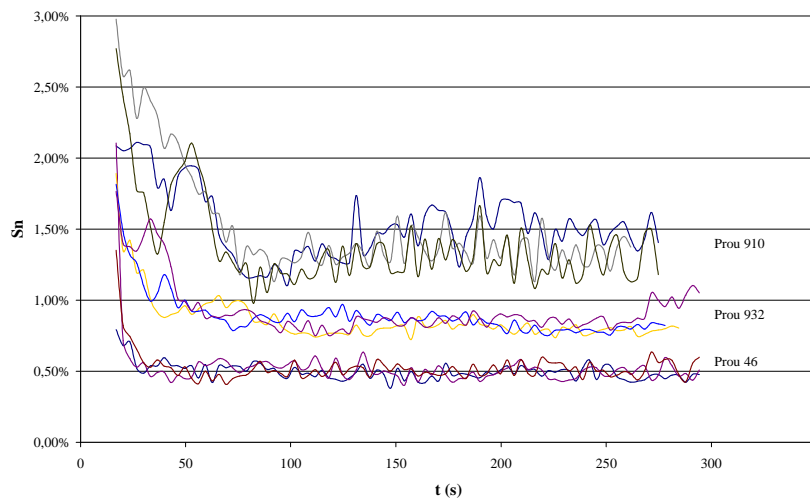
Une corrélation entre les profils de concentration de l'argent et du zinc est difficile à établir : il ne semble pas que les monnaies pour lesquelles un enrichissement de surface apparaît sur les profils de l'argent soient celles pour lesquelles des différences de teneurs importantes apparaissent entre les premières secondes de l'analyse et le palier de stabilité pour le zinc.

L'échantillon Prou 127, pour lequel un seul profil de concentration de l'argent avait pu être utilisé pour déterminer une teneur, présente des profils sensiblement identiques pour le zinc (Figure 49). Il semble donc que la stabilité des profils de concentration entre éléments majeurs et éléments mineurs principaux pour un même échantillon ne soit pas systématiquement liée.

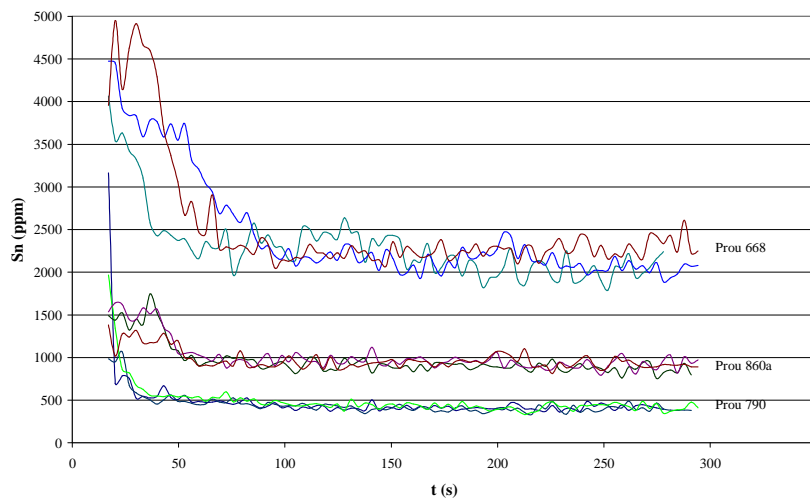
Les profils de concentration obtenus pour le zinc peuvent être linéaires, même dans des cas où la teneur déterminée est légèrement inférieure à la limite de détection dans ce menu d'analyse et pour cet élément : les courbes correspondant à Prou 565a, qui d'après les profils contient environ 900 ppm de zinc, sont en effet linéaires, alors que la limite de détection calculée pour cet élément lors d'une analyse en temps réel est de 1200 ppm. Un décalage existe néanmoins avec la teneur déterminée dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces (504 ppm). Il semble donc que l'analyse du zinc en profil de concentration pour cette monnaie surestime la teneur réelle de cet élément du fait d'un signal brut très faible par rapport au bruit de fond, même si les courbes d'évolution de la teneur en zinc sont linéaires et superposables. C'est donc la valeur calculée dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces qui doit être privilégiée pour les échantillons comme celui-ci.

#### *ii - L'étain*

Les profils de concentration obtenus pour l'étain, ainsi que les teneurs calculées à partir de ces profils, ont également été examinés. Les courbes d'évolution des teneurs en fonction du temps montrent une bonne reproductibilité des analyses (Figure 51 et 52). Elle est confirmée par l'examen des teneurs déduites de ces profils et présentées dans le Tableau 17. Cette reproductibilité est observée pour des monnaies dont la teneur en étain s'est révélée nettement supérieure à la limite de détection de cet élément dans ce menu d'analyse (450 ppm – exemples présentés sur la Figure 51 et Prou 668 sur la Figure 52), ainsi que pour les pièces dont la teneur en étain est plus proche de cette limite (Prou 860a et Prou 790 sur la Figure 52).



**Figure 51** - Superposition des trois profils de concentration de l'étain obtenus pour trois monnaies anciennes contenant plus de 0,5 % de cet élément.



**Figure 52**- Superposition des trois profils de concentration de l'étain obtenus pour trois monnaies anciennes contenant moins de 0,5 % de cet élément.

Référence		Teneur en étain	Ecart-type relatif calculé sur l'ensemble des valeurs du profil
<b>Prou 910</b>	Profil 1	1,34%	14,9%
	Profil 2	1,29%	16,5%
	Profil 3	1,46%	14,2%
	moyenne	<b>1,36%</b>	15,2%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>6,41%</b>	
<b>Prou 932</b>	Profil 1	0,81%	8,1%
	Profil 2	0,83%	7,9%
	Profil 3	0,85%	8,0%
	moyenne	<b>0,83%</b>	8,0%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>2,41%</b>	
<b>Prou 46</b>	Profil 1	0,48%	10,3%
	Profil 2	0,49%	14,6%
	Profil 3	0,51%	13,0%
	moyenne	<b>0,49%</b>	12,6%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>3,10%</b>	
<b>Prou 668</b>	Profil 1	2186 ppm	12,7%
	Profil 2	2132 ppm	7,8%
	Profil 3	2236 ppm	7,9%
	moyenne	<b>2185 ppm</b>	9,5%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>2,38%</b>	
<b>Prou 860a</b>	Profil 1	908 ppm	11,0%
	Profil 2	951 ppm	11,0%
	Profil 3	939 ppm	9,7%
	moyenne	<b>933 ppm</b>	10,6%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>2,38%</b>	
<b>Prou 790</b>	Profil 1	403 ppm	14,9%
	Profil 2	413 ppm	13,0%
	Profil 3	428 ppm	15,1%
	moyenne	<b>415 ppm</b>	14,3%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>3,03%</b>	

**Tableau 17** - Résultats obtenus pour l'étain à partir de profils de concentration pour six monnaies anciennes.

Les teneurs en étain calculées à partir des profils de concentration confirment la bonne reproductibilité des analyses effectuées sur une même monnaie : l'écart-type relatif calculé à partir des trois teneurs obtenues pour chacun des profils est inférieur à 10 % dans tous les cas, et inférieur à 5 % dans la majorité des cas.

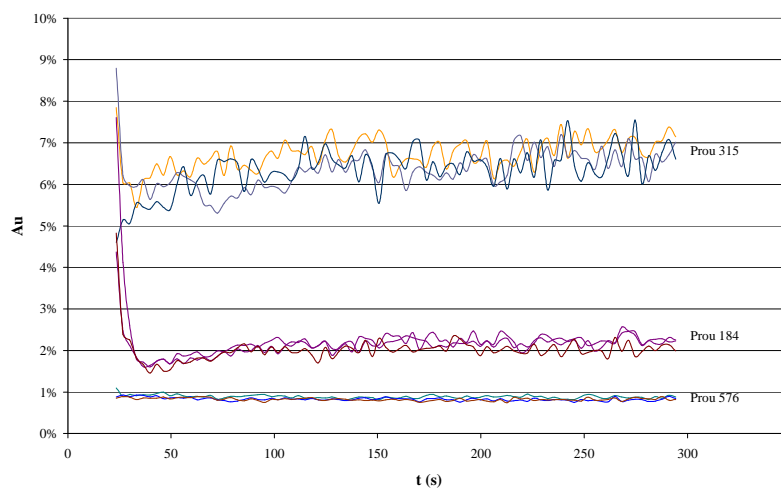
Une décroissance des teneurs au début de l'analyse est visible pour la plupart des échantillons avant qu'un palier de stabilité ne soit atteint. La durée nécessaire pour atteindre la stabilisation des valeurs est toutefois moins importante que celles observées pour le zinc.

D'une manière générale, l'analyse de l'étain en profil de concentration dans le menu d'analyse des éléments majeurs permet d'obtenir des courbes superposables et de calculer des valeurs reproductibles pour les échantillons qui présentent des teneurs supérieures à la limite de détection.

### *iii - L'or*

Les teneurs en or dans les monnaies anciennes sont fréquemment supérieures à la limite de détection de cet élément dans le menu d'analyse des éléments majeurs (500 ppm). C'est donc la valeur déterminée dans ce menu d'analyse qui est conservée le plus souvent. L'or est de plus un élément dont les différences de teneurs peuvent être utilisées pour des études de provenance. La reproductibilité de l'analyse de cet élément en profils de concentration est donc primordiale pour l'interprétation historique des résultats.

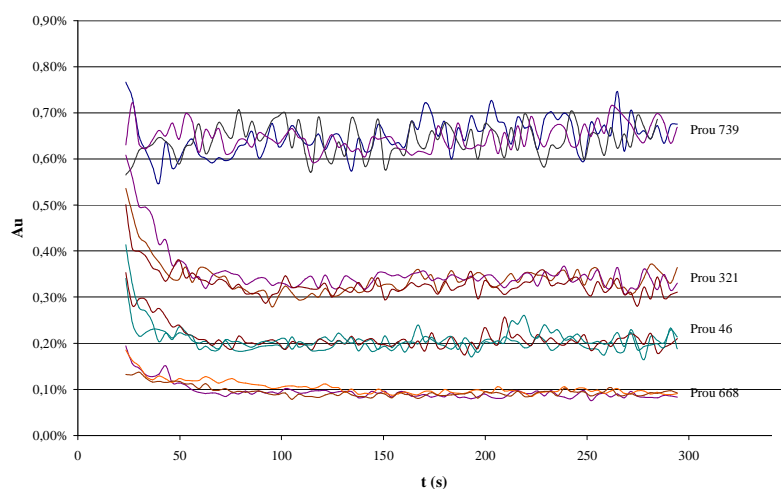
Les profils de concentration présentés sur les Figures 53 et 54 montrent une bonne cohérence des analyses pratiquées sur une même monnaie pour l'or. La reproductibilité des teneurs calculées à partir de chacun des trois profils effectués sur une même monnaie est également satisfaisante (Tableau 18).



**Figure 53** - Superposition des trois profils de concentration de l'or obtenus pour trois monnaies anciennes contenant plus de 0,9 % de cet élément.

Référence		Teneur en or	Ecart-type relatif calculé sur l'ensemble des valeurs du profil
<b>Prou 315</b>	Profil 1	6,82%	7,1%
	Profil 2	6,49%	8,2%
	Profil 3	6,50%	9,7%
	moyenne	<b>6,60%</b>	8,3%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>2,84%</b>	
<b>Prou 184</b>	Profil 1	2,20%	8,9%
	Profil 2	2,20%	8,4%
	Profil 3	2,03%	10,7%
	moyenne	<b>2,14%</b>	9,3%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>4,58%</b>	
<b>Prou 576</b>	Profil 1	0,87%	5,9%
	Profil 2	0,82%	6,1%
	Profil 3	0,82%	6,5%
	moyenne	<b>0,84%</b>	6,2%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>3,45%</b>	
<b>Prou 739</b>	Profil 1	0,65%	7,5%
	Profil 2	0,64%	8,9%
	Profil 3	0,64%	6,6%
	moyenne	<b>0,64%</b>	7,7%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>0,90%</b>	
<b>Prou 321</b>	Profil 1	0,33%	7,5%
	Profil 2	0,34%	6,0%
	Profil 3	0,32%	7,3%
	moyenne	<b>0,33%</b>	6,9%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>3,03%</b>	
<b>Prou 46</b>	Profil 1	0,20%	9,8%
	Profil 2	0,20%	10,6%
	Profil 3	0,21%	11,3%
	moyenne	<b>0,20%</b>	10,6%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>2,84%</b>	
<b>Prou 668</b>	Profil 1	897 ppm	9,8%
	Profil 2	949 ppm	7,2%
	Profil 3	896 ppm	8,1%
	moyenne	<b>914 ppm</b>	8,4%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>3,32%</b>	

**Tableau 18** - Résultats obtenus pour l'or à partir de profils de concentration pour sept monnaies anciennes.



**Figure 54** - Superposition des trois profils de concentration de l'or obtenus pour quatre monnaies anciennes contenant moins de 0,9 % de cet élément.

La variabilité des valeurs instantanées pour certaines monnaies peut sembler importante au vu des profils de concentration, comme c'est le cas pour les échantillons Prou 315 (Figure 53) et Prou 739 (Figure 54). Les teneurs moyennes calculées à partir de chacun des profils sont toutefois très proches, et l'écart-type relatif déterminé à partir de l'ensemble des valeurs prises en compte pour le calcul des teneurs pour chaque profil est inférieur à 10 % pour ces deux monnaies comme pour les autres.

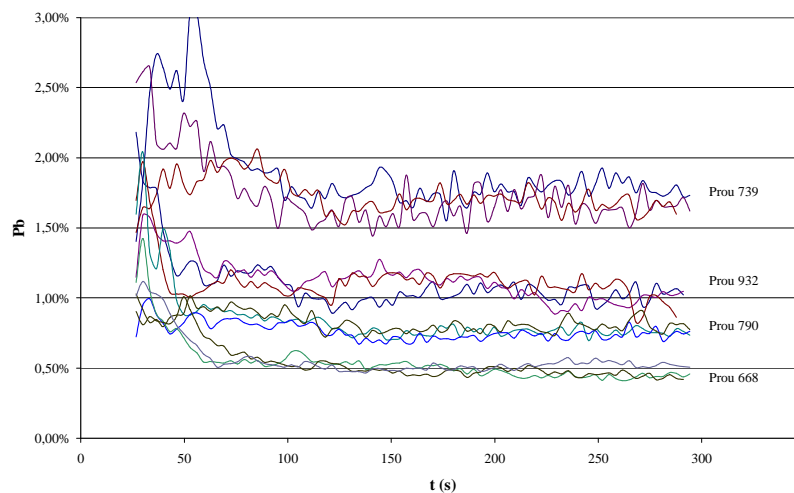
#### *iv - Le plomb*

Le plomb est l'élément mineur le plus abondant dans la plupart des monnaies anciennes à base d'argent. C'est également cet élément qui présente les variabilités de teneurs les plus faibles d'un échantillon à l'autre, ou d'un *corpus* monétaire à l'autre : les teneurs en plomb oscillent, dans une grande majorité des cas, entre 0,5 % et 1,5 %.

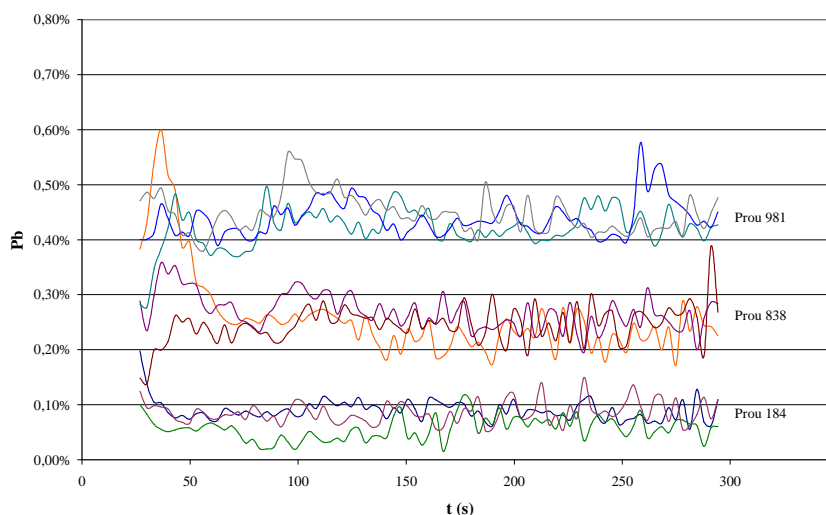
Les profils obtenus pour quelques monnaies sont présentés sur les Figures 55 et 56. Comme cela a été observé dans les paragraphes précédents relatifs aux autres éléments mineurs principaux, les profils de concentration obtenus pour le plomb peuvent être linéaires (Prou 668 sur la Figure 55) ou plus fluctuants (par exemple Prou 739 sur la Figure 55, ou Prou 838 sur la Figure 56).

Référence		Teneur en plomb	Ecart-type relatif calculé sur l'ensemble des valeurs du profil
<b>Prou 739</b>	Profil 1	1,77%	7,3%
	Profil 2	1,63%	9,8%
	Profil 3	1,68%	5,8%
	moyenne	<b>1,69%</b>	7,6%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>4,19%</b>	
<b>Prou 932</b>	Profil 1	1,03%	8,2%
	Profil 2	1,04%	9,9%
	Profil 3	1,10%	6,7%
	moyenne	<b>1,06%</b>	8,3%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>3,58%</b>	
<b>Prou 790</b>	Profil 1	0,73%	9,4%
	Profil 2	0,77%	7,7%
	Profil 3	0,79%	8,2%
	moyenne	<b>0,76%</b>	8,4%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>4,00%</b>	
<b>Prou 668</b>	Profil 1	0,49%	11,5%
	Profil 2	0,47%	6,6%
	Profil 3	0,51%	7,0%
	moyenne	<b>0,49%</b>	8,4%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>4,08%</b>	
<b>Prou 981</b>	Profil 1	0,42%	8,4%
	Profil 2	0,44%	9,3%
	Profil 3	0,45%	9,5%
	moyenne	<b>0,44%</b>	9,1%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>3,50%</b>	
<b>Prou 838</b>	Profil 1	0,23%	20,1%
	Profil 2	0,26%	14,9%
	Profil 3	0,25%	17,6%
	moyenne	<b>0,25%</b>	17,5%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>6,19%</b>	
<b>Prou 184</b>	Profil 1	606 ppm	63,7%
	Profil 2	893 ppm	30,6%
	Profil 3	866 ppm	41,8%
	moyenne	<b>788 ppm</b>	45,4%
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>20,10%</b>	

**Tableau 19** - Résultats obtenus pour le plomb à partir de profils de concentration pour sept monnaies anciennes.



**Figure 55** - Superposition des trois profils de concentration du plomb obtenus pour quatre monnaies anciennes contenant plus de 0,5 % de cet élément.



**Figure 56** - Superposition des trois profils de concentration du plomb obtenus pour trois monnaies anciennes contenant moins de 0,5 % de cet élément.

Les teneurs moyennes calculées sur chacun des profils regroupées dans le Tableau 19 montrent également la bonne reproductibilité des analyses pour le plomb. A l'exception de la monnaie dont la teneur en plomb est la plus faible (Prou 184 à 788 ppm), l'écart-type relatif calculé à partir des trois teneurs obtenues pour chacune des analyses est de l'ordre de 5 %.

La reproductibilité des profils de concentration et des valeurs qui en sont déduites montre donc que les teneurs déterminées pour le plomb sont représentatives de l'ensemble des alliages constituant les monnaies d'argent.



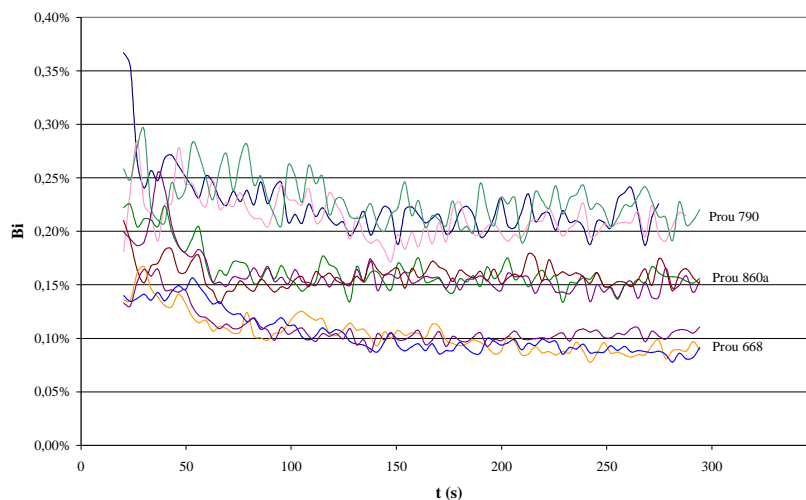
*v - Le bismuth*

Les teneurs en bismuth sont, d'une manière générale, relativement faibles en comparaison avec les quatre autres éléments mineurs principaux. Des analyses antérieures ont toutefois révélé des valeurs de l'ordre du pourcent, voire de plusieurs pourcents (Cowell et Lowick, 1988 ; McKerrell et Stevenson, 1972).

Quels que soient les *corpus* monétaires considérés et les teneurs en bismuth qui les caractérisent, l'analyse de cet élément doit être effectuée en profil de concentration dans le menu d'analyse des éléments majeurs : c'est en effet le bismuth, parmi les cinq éléments mineurs principaux, qui présente la limite de détection en profil de concentration la plus basse (100 ppm).

Les profils de concentration du bismuth effectués sur une même monnaie s'avèrent très reproductibles pour les échantillons considérés qui présentent des teneurs diverses pour cet élément (Figure 57 et 58).

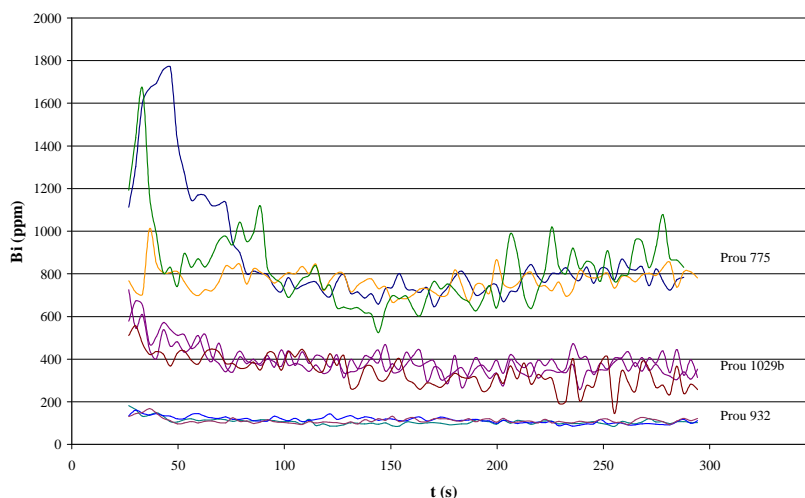
Les teneurs déterminées à partir des profils sont en très bon accord, et les écart-types relatifs calculés à partir de ces valeurs sont faibles (Tableau 20). Le dosage du bismuth dans le menu d'analyse des éléments majeurs semble donc permettre d'obtenir des teneurs reproductibles et représentatives.



**Figure 57** - Superposition des trois profils de concentration du bismuth obtenus pour trois monnaies anciennes contenant plus de 0,1 % de cet élément.

Référence	Teneur en bismuth	Ecart-type relatif calculé sur l'ensemble des valeurs du profil
<b>Prou 790</b>	Profil 1	0,21%
	Profil 2	0,21%
	Profil 3	0,22%
	moyenne	<b>0,21%</b>
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>2,71%</b>
<b>Prou 860a</b>	Profil 1	0,16%
	Profil 2	0,15%
	Profil 3	0,16%
	moyenne	<b>0,16%</b>
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>3,69%</b>
<b>Prou 669</b>	Profil 1	932 ppm
	Profil 2	952 ppm
	Profil 3	912 ppm
	moyenne	<b>932 ppm</b>
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>2,15%</b>
<b>Prou 775</b>	Profil 1	756 ppm
	Profil 2	759 ppm
	Profil 3	781 ppm
	moyenne	<b>765 ppm</b>
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>1,78%</b>
<b>Prou 1029b</b>	Profil 1	360 ppm
	Profil 2	373 ppm
	Profil 3	305 ppm
	moyenne	<b>346 ppm</b>
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>10,43%</b>
<b>Prou 932</b>	Profil 1	101 ppm
	Profil 2	105 ppm
	Profil 3	109 ppm
	moyenne	<b>105 ppm</b>
	écart-type relatif sur les 3 valeurs	<b>3,81%</b>

**Tableau 20** - Résultats obtenus pour le bismuth à partir de profils de concentration pour six monnaies anciennes.



**Figure 58-** Superposition des trois profils de concentration du bismuth obtenus pour trois monnaies anciennes contenant moins de 0,1 % de cet élément.

Les profils de concentration obtenus pour Prou 932 révèlent une teneur en bismuth de 105 ppm très proche de la limite de détection de cet élément dans ce menu d'analyse de 100 ppm (Figure 58 et Tableau 20). La valeur obtenue dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces pour cet échantillon est de 129 ppm ; les teneurs proches de la limite de détection du menu d'analyse des éléments majeurs semblent donc en bon accord avec celles déterminées dans l'autre menu d'analyse.

### *c. Conclusion*

L'examen des profils de concentration et des teneurs qui en sont déduites montre que cette approche analytique permet d'obtenir des valeurs reproductibles et représentatives de l'alliage sain. Les paramètres définis pour le menu d'analyse des éléments majeurs sont donc appropriés pour les monnaies anciennes à base d'argent.

Certaines monnaies présentent un ou plusieurs profils qui ne permettent pas de calculer une teneur, pour l'argent ou pour un des éléments mineurs principaux. Cela traduit vraisemblablement une corrosion importante de l'alliage. L'analyse d'échantillons très corrodés, quelle que soit la méthode employée, ne représente pas la composition de l'alliage tel qu'il a été frappé. Les teneurs déterminées pour de telles monnaies présentent donc un intérêt limité du point de vue historique. L'analyse par LA-ICP-MS en profils de concentration permet de visualiser la corrosion des échantillons sans causer leur destruction. Il est donc possible par cette approche de dissocier ces monnaies des autres lors de l'interprétation historique des résultats. De tels cas sont relativement rares et, pour une grande

majorité des échantillons, la reproductibilité des analyses par LA-ICP-MS est excellente. La taille des micro-prélèvements par ablation laser n'est donc pas une limitation pour la majorité des monnaies d'argent.

## 2. L'analyse des éléments mineurs et traces

Le signal des éléments mineurs et traces ne peut pas être mesuré en temps réel comme c'est le cas pour les éléments majeurs. Les teneurs déterminées dans le menu d'analyse de ces éléments ne sont donc pas obtenues à partir de profils de concentration : l'accumulation du signal durant l'acquisition conduit à l'obtention d'une valeur pour chaque isotope et pour chacune des trois analyses effectuées sur chaque échantillon.

La représentativité de l'analyse des éléments mineurs et traces est donc étudiée à travers la reproductibilité des teneurs calculées à partir de chacun des trois micro-prélèvements effectués sur chaque monnaie.

Élément	Ecart-type relatif moyen	Teneur minimale (ppm)	Teneur maximale (ppm)	Limite de détection (ppm)
Fe	69%	58	1622	35
Ni	9%	3,4	408	2,5
Zn	27%	1,2	862	0,23
Cu	8%	467	881	1
As	15%	1,5	1301	0,63
Se	29%	12	45	9,8
Ru	33%	0,07	0,13	0,04
Rh	13%	0,18	0,26	0,01
Pd	18%	0,51	20	0,14
Cd	40%	0,14	3,9	0,04
In	22%	0,05	2,8	0,01
Sn	20%	2,6	564	0,54
Sb	15%	0,55	696	0,11
Te	31%	0,44	3,8	0,17
Os	26%	0,02	0,05	0,07
Ir	27%	0,02	0,07	0,02
Pt	26%	0,11	6,5	0,03
Au	3%	41	675	0,04
Hg	38%	11	3642	1,7
Tl	27%	872	936	1,5
Pb	12%	368	372	0,01
Bi	7%	8,4	191	0,02

**Tableau 21** - Valeurs moyennes d'écart-types relatifs calculés à partir des teneurs obtenues pour chacun des trois micro-prélèvements effectués sur un même échantillon. Les teneurs minimales et maximales prises en compte sont également présentées, ainsi que les limites de détection.

Quinze à quarante analyses de monnaies anciennes ont été considérées pour les différents éléments mineurs et traces. Pour chaque isotope et chaque échantillon, la valeur de bruit de fond et les trois valeurs de signal brut d'acquisition ont été utilisées. Les trois analyses effectuées sur une même monnaie ont été considérées comme indépendantes, et une composition a été calculée à partir de chacune de ces trois acquisitions. Les teneurs de chaque élément obtenues

ainsi ont été comparées entre elles, et l'écart-type relatif calculé sur les trois valeurs. Ces valeurs sont récapitulées dans le Tableau 21.

Seules les teneurs supérieures aux limites de détection ont été considérées ; pour les cinq éléments mineurs principaux (Zn, Sn, Au, Pb et Bi), les cas pour lesquels la teneur déterminée dans le menu d'analyse des éléments majeurs a été privilégiée ont été exclus de ces calculs.

La mesure du signal du fer est entachée d'une erreur importante due à l'interférence de la recombinaison  $^{56}\text{Ar-O}^+$ . D'une manière générale, le bruit de fond mesuré à la masse 56 est de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers de coups, et le signal brut mesuré lors d'une acquisition n'est que très légèrement supérieur. Un dosage précis du fer dans de telles conditions est difficile à mettre en œuvre : il est ainsi fréquent que le signal du fer mesuré lors des trois acquisitions qui correspondent à une même monnaie soit inférieur à la valeur du bruit de fond. Lorsque le signal mesuré est supérieur au bruit de fond, les teneurs calculées d'une analyse à l'autre sur un même échantillon sont très variables : l'écart-type relatif moyen calculé pour les trois teneurs obtenues pour une même monnaie est de 69 %. Le dosage du fer est donc très peu précis lorsqu'il est possible, et ce même pour des teneurs relativement importantes.

Certaines monnaies d'argent particulièrement pures présentent des teneurs en cuivre de l'ordre de quelques centaines de ppm. Le dosage de cet élément doit donc être effectué dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces pour de tels échantillons, et non dans le menu d'analyse des éléments majeurs comme c'est le cas pour la majorité des monnaies d'argent.

Les teneurs en cuivre déterminées dans les monnaies d'argent extrêmement pures sont très reproductibles d'une analyse à l'autre : l'écart-type relatif calculé à partir des trois teneurs obtenues à partir des trois analyses effectuées sur un même échantillon est en effet de 8 %. L'analyse de très faibles teneurs en cuivre dans des monnaies d'argent qui contiennent très peu d'impuretés est donc représentative.

Les cinq éléments mineurs principaux (Zn, Sn, Au, Pb et Bi) présentent le plus souvent les teneurs les plus élevées parmi l'ensemble des éléments mineurs et traces. De ce fait, les concentrations de ces éléments, même dans les cas où elles sont trop faibles pour permettre un dosage dans le menu d'analyse des éléments majeurs, sont d'une manière générale largement supérieures aux limites de détection. Le rapport signal/bruit pour les isotopes de ces éléments est donc élevé, et l'incertitude sur les teneurs déterminées pour chaque analyse est faible.

L'analyse des cinq éléments mineurs principaux dans le menu d'analyse des éléments majeurs a montré une répartition homogène de ces éléments pour les teneurs élevées. Il s'agit maintenant d'étudier la reproductibilité de l'analyse de ces mêmes éléments lorsque leurs teneurs sont moindres et que leur dosage est effectué dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces.

L'étude des écarts-types moyens calculés à partir des trois acquisitions met en évidence deux groupes distincts parmi les cinq éléments mineurs principaux : d'une part le zinc et l'étain, pour lesquels la moyenne des écarts-types relatifs est de 20 % à 30 % ; d'autre part l'or, le plomb et le bismuth, qui présentent quant à eux des écarts-types relatifs moyens compris entre 3 % et 12 %.

La variabilité des teneurs en zinc et en étain peut s'expliquer par une répartition peu homogène de ces éléments dans les alliages. Le dosage du zinc et de l'étain pour de faibles teneurs n'est donc pas excellent comme celui des trois autres éléments mineurs principaux, mais reste satisfaisant.

Les concentrations en or, plomb et bismuth sont d'une manière générale plus élevées que leurs limites de détection de plusieurs ordres de grandeur. Le plomb présente des teneurs minimales de quelques centaines de ppm ; l'incertitude liée à la proximité des concentrations avec la limite de détection est donc négligeable pour cet élément. L'or et le bismuth sont quant à eux susceptibles de présenter des teneurs de l'ordre de quelques ppm seulement. Ces deux éléments bénéficient de limites de détection très basses inférieures au dixième de ppm, ce qui permet le dosage de concentrations infimes avec de faibles incertitudes. Les très faibles écart-types relatifs calculés à partir des teneurs obtenues pour chacun des trois prélèvements effectués sur un même échantillon montrent que le dosage de l'or, du plomb et du bismuth est représentatif.

Parmi les cinq éléments mineurs principaux, l'or et le bismuth sont les deux constituants qui sont le plus susceptibles de s'avérer utiles pour des études de provenance. Or, c'est dans cette optique qu'est effectué le dosage des éléments mineurs et traces ; il est donc satisfaisant que les teneurs en or et en bismuth soient les plus reproductibles parmi les cinq éléments mineurs principaux.

Deux éléments peuvent présenter des teneurs relativement élevées en comparaison avec la plupart des autres éléments-traces : l'arsenic et l'antimoine. On observe, pour ces deux éléments, une reproductibilité satisfaisante des analyses. Les écarts-types relatifs calculés à partir des trois analyses effectuées sur un même échantillon sont de 15 % en moyenne pour l'arsenic comme pour l'antimoine. L'analyse de ces deux éléments par ICP-MS à partir de micro-prélèvements effectués par ablation laser semble représentative de l'ensemble de l'échantillon.

Certains des éléments du groupe du platine (Ru, Rh, Pd, Os, Ir et Pt) peuvent être utilisés pour l'étude de la provenance des métaux précieux utilisés contenus dans les monnaies. Les teneurs de ces constituants sont généralement inférieures à la ppm, voire au maximum de quelques ppm.

L'étude de l'écart-type relatif calculé à partir des teneurs déterminées pour chacune des trois analyses effectuées sur plusieurs monnaies montre une variabilité relativement importante des concentrations : les écarts-types moyens pour les six éléments considérés s'échelonnent de 13 % pour le rhodium à 33 % pour le ruthénium. Pour le rhodium, la bonne reproductibilité des analyses est due à l'interférence de la recombinaison  $^{103}\text{Ar-Cu}^+$ . Ce n'est pas le rhodium qui est mesuré à la masse 103 mais cette espèce recombinaisonnée : les teneurs en rhodium dans l'ensemble des échantillons analysés sont en effet trop faibles pour être mesurées. Pour les autres éléments, la reproductibilité des analyses effectuées sur une même monnaie est satisfaisante si l'on considère leurs très faibles concentrations. Les teneurs déterminées pourront être utilisées par exemple pour différencier des monnaies dont la concentration d'un de ces éléments varie d'un ordre de grandeur.

Les éléments dosés dans le menu d'analyse des éléments mineurs et traces qui n'ont pas encore été considérés du point de vue de la représentativité des analyses sont Ni, Se, Cd, In, Te, Hg et Tl.

Le nickel et le mercure sont les deux constituants qui sont susceptibles de présenter les teneurs les plus élevées parmi ces sept éléments.

La reproductibilité des analyses est satisfaisante pour le nickel : l'écart-type moyen calculé pour les teneurs déterminées à partir des trois analyses effectuées sur une même monnaie est de 9 %. Il semble donc que l'analyse du nickel soit représentative.

Il n'en est pas de même pour le mercure : l'écart-type moyen pour cet élément est en effet de 38 %. Il semble donc que la répartition du mercure dans les monnaies d'argent soit peu homogène à l'échelle des micro-prélèvements effectués lors de l'analyse par LA-ICP-MS. Les teneurs déterminées pour cet élément sont de ce fait seulement indicatives.

Les cinq autres éléments (Se, Cd, In, Te et Tl) présentent des teneurs généralement plus faibles, le plus souvent de l'ordre de quelques ppm ou de fractions de ppm.

Le dosage de l'indium n'est pas représentatif de la teneur réelle de cet élément dans les échantillons : une corrélation linéaire peut en effet être établie entre les teneurs en indium et en étain. Cela est vraisemblablement dû à

l'interférence de  $^{115}\text{Sn}$  avec l'isotope  $^{115}\text{In}$  mesuré pour le dosage de l'indium, bien que l'abondance isotopique de  $^{115}\text{Sn}$  soit de 0,36 % seulement. La détection d'un isotope de l'indium autre que  $^{115}\text{In}$  est difficilement envisageable : cet isotope est en effet prépondérant, d'une abondance isotopique de 95,7 %. Le seul autre isotope stable de l'indium,  $^{113}\text{In}$ , ne représente que 4,3 % de l'ensemble des atomes de cet élément. La mesure d'un isotope d'une abondance naturelle si faible n'est pas possible pour un élément aussi peu concentré. Il semble donc que le dosage de l'indium ne puisse pas être effectué de manière satisfaisante, sauf pour les teneurs élevées pour lesquelles l'interférence de l'isotope de l'étain représente une contribution négligeable de l'ensemble des espèces détectées à la masse 115.

Pour les autres éléments, les valeurs d'écart-type sont comprises entre 27 % et 40 %, ce qui traduit une variabilité relativement importante des teneurs déterminées d'une ablation à l'autre sur une même monnaie. Les concentrations très faibles de ces éléments, et la proximité entre les valeurs de bruit de fond et de signal brut d'acquisition, sont à l'origine de la variabilité des teneurs obtenues pour ces éléments pour un même échantillon.

La reproductibilité des teneurs déterminées pour un élément sur un même échantillon est globalement acceptable pour la plupart des éléments dosés, sous réserve que la concentration moyenne soit nettement supérieure à la limite de détection. Il convient donc de s'assurer que les réglages de l'ICP-MS permettent une bonne sensibilité pour ce menu d'analyse afin d'optimiser le rapport signal/bruit.

Le dosage des cinq éléments mineurs principaux, parmi lesquels certains peuvent s'avérer utiles pour des études de provenance (Au et Bi), semble reproductible et donc représentatif. L'analyse de l'arsenic et de l'antimoine, ainsi que des éléments du groupe du platine, qui sont également susceptibles de différencier des sources de métaux précieux différentes, est moins reproductible ; les incertitudes restent toutefois acceptables.

Des teneurs au moins indicatives peuvent être déterminées, et pourront être comparées entre elles lors de l'interprétation historique des résultats.

### **3. La reproductibilité de l'analyse complète de monnaies anciennes**

En plus de la reproductibilité des analyses effectuées sur une même monnaie au cours d'une même séance, deux échantillons ont été étudiés à plusieurs reprises afin d'étudier la variation des teneurs d'une séance d'analyse à l'autre. Les monnaies référencées XRAC2 et XRAC5 ont ainsi été analysées huit fois sur une période d'un an. La moyenne des teneurs obtenues pour chaque élément, ainsi que



les teneurs minimales, maximales et les écarts-types relatifs calculés à partir des huit valeurs, sont reportés dans le Tableau 22.

Elément	XRAC2				XRAC5			
	valeur minimale	valeur maximale	valeur moyenne	écart-type relatif	valeur minimale	valeur maximale	valeur moyenne	écart-type relatif
Ag	90,6%	92,3%	91,7%	0,54%	85,3%	87,1%	86,1%	0,7%
Cu	5,3%	7,6%	6,6%	9,5%	11,4%	13,1%	12,4%	4,7%
Fe	0	410	55	261,5%	6,7	64	20	97,9%
Ni	0,73	2,87	1,5	59,0%	14	24	22	15,9%
Zn	238	288	257	7,8%	1797	2387	1974	10,6%
As	21	31	27	15,2%	76	112	103	12,6%
Se	0,21	0,23	0,22	7,3%	3,6	5,4	4,5	28,0%
Ru	0,09	0,27	0,17	39,6%	0,04	0,20	0,10	53,4%
Rh	0,29	0,87	0,60	34,2%	0,6	1,5	1,09	36,0%
Pd	0,82	1,7	1,28	27,1%	0,7	2,3	1,50	41,1%
Cd	0,39	0,64	0,49	17,1%	0,26	0,92	0,47	46,8%
In	1,1	1,6	1,2	15,2%	4,2	7,7	5,02	24,0%
Sn	310	432	332	12,3%	1353	1576	1468	5,9%
Sb	18	20	19	4,1%	68	84	72	7,8%
Te	0,57	1,01	0,80	16,2%	0,8	1,34	1,06	16,3%
Os	nd	nd	nd	-	nd	0,01	0,01	141,%
Ir	0,03	0,03	0,03	16,4%	0,03	0,05	0,04	29,2%
Pt	0,43	0,64	0,53	12,7%	0,46	0,63	0,52	11,9%
Au	2231	2824	2616	12,4%	2571	2852	2666	4,0%
Hg	57	218	128	53,0%	45	865	204	144,7%
Pb	10124	14792	11710	12,4%	7684	9528	8666	6,8%
Tl	0,05	0,10	0,08	21,8%	0,05	0,14	0,10	33,0%
Bi	526	606	551	4,5%	343	512	461	12,9%

**Tableau 22** – Teneurs minimales, maximales, moyennes et écarts-types relatifs calculés à partir d'analyses répétées de mêmes échantillons au cours de séances différentes. Argent et cuivre en pourcents. Autres éléments en ppm. nd : non détecté.

L'examen des teneurs minimale, maximale et moyenne pour l'argent montre une bonne reproductibilité des analyses. Les écarts absolus entre teneurs minimale et maximale sont inférieurs à 2 %, et les écart-types relatifs inférieurs à 1 %. Le dosage de l'argent et du cuivre semble donc reproductible d'une séance à l'autre.

Il en est de même pour les cinq éléments mineurs principaux (Zn, Sn, Au, Pb et Bi) pour lesquels les écarts-types relatifs calculés pour les huit teneurs déterminées sont de l'ordre de 5 % à 15 % selon les éléments et selon leur teneur. Les écarts entre les teneurs minimales et maximales sont également relativement faibles pour ces éléments.

L'arsenic et l'antimoine, dont les teneurs sont les plus importantes après les cinq éléments mineurs principaux, présentent également une bonne reproductibilité

de leur dosage sur une longue période : l'écart-type relatif calculé à partir des huit valeurs obtenues est pour les deux échantillons de l'ordre de 15 % pour l'arsenic et de 5 % pour l'antimoine.

Les teneurs des autres éléments dans les échantillons XRAC2 et XRAC5 sont, à l'image de ce qui est observé d'une manière générale dans les monnaies d'argent, de l'ordre de quelques ppm ou de fractions de ppm. Les écarts-types relatifs sont variables selon les éléments et selon l'écart entre les teneurs et les limites de détection de l'élément considéré. La variabilité des valeurs est d'une manière générale satisfaisante pour ces éléments présents à l'état de traces.

Enfin, les teneurs en fer et en mercure présentent une grande variabilité au cours de séances d'analyse différentes. L'incertitude du dosage de ces deux éléments avait déjà été observée lors de la comparaison des analyses effectuées sur un même échantillon lors d'une même séance. Le dosage du fer et du mercure semble très aléatoire, leurs teneurs ne pourront donc pas être utilisées pour l'interprétation historique des résultats.

## **V. Comparaison avec l'analyse par ANRC**

La comparaison des résultats obtenus par LA-ICP-MS avec ceux fournis par l'ANRC est la dernière étape de la validation du protocole développé<sup>4</sup>. Plus de cent monnaies ont été analysées par ces deux méthodes.

Les limites de détection en ANRC ne sont pas aussi basses qu'en LA-ICP-MS. Le nombre d'éléments qu'il est possible de détecter est de plus largement inférieur. Seuls les teneurs des éléments suivants peuvent être comparées : Ag, Cu, Zn, As, Sn, Sb, Au et Pb.

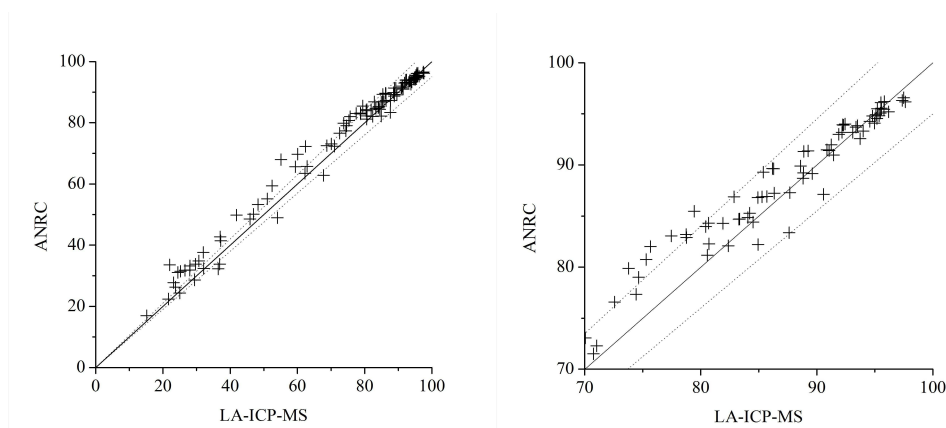
La plupart des éléments mineurs et traces dosés par LA-ICP-MS ne font pas partie de cette liste. La comparaison des résultats obtenus par LA-ICP-MS avec ceux fournis par une autre méthode d'analyse, et donc l'estimation de la précision du dosage par la nouvelle méthode n'est pas possible pour ces éléments.

### **1. L'argent**

Les teneurs en argent des monnaies analysées par LA-ICP-MS et par ANRC ont été comparées. Les résultats sont présentés sur les Figures 59a et b.

---

<sup>4</sup> La comparaison de l'intégralité des teneurs déterminées par LA-ICP-MS et par ANRC en argent, cuivre, plomb, or, zinc, étain, arsenic et antimoine apparaît dans l'Annexe 3.



**Figures 59a et 59b** - Comparaison des teneurs en argent déterminées par LA-ICP-MS et par ANRC. Les droites qui apparaissent sur ces figures représentent la première bissectrice d'équation  $y=x$  ainsi que les droites d'erreur à plus ou moins 5 % relatifs. Toutes les teneurs sont exprimées en pourcents.

L'examen de ces deux graphiques montre un bon accord entre les deux méthodes pour l'argent. L'écart relatif entre les deux méthodes est inférieur à 5 % pour près de 65 % des échantillons analysés par LA-ICP-MS et ANRC. Les écarts relatifs supérieurs à 5 % sont plutôt observés pour les alliages de titre faible, et pour lesquels un écart de cet ordre peut être toléré.

Les monnaies pour lesquelles un titre d'argent supérieur à 90 % a été déterminé présentent des écarts minimes entre LA-ICP-MS et ANRC, de l'ordre de 1 % relatif ou inférieurs. Pour les titres d'argent inférieurs à 90 %, on observe d'une manière générale des teneurs supérieures pour l'ANRC par rapport à celles déterminées par LA-ICP-MS.

L'examen de la Figure 59b pour les monnaies d'un titre compris entre 70 % et 90 % d'argent montre que les écarts entre les deux méthodes augmentent progressivement lorsque le titre diminue dans cette gamme de teneurs. Pour des monnaies de titre d'argent similaire, les teneurs calculées par les deux méthodes peuvent également être très proches ou sensiblement différentes.

L'explication de l'écart observé entre LA-ICP-MS et ANRC pour les monnaies d'un titre d'argent inférieur à 90 % tient à la géométrie des échantillons et aux caractéristiques analytiques des deux méthodes comparées.

Les exemplaires analysés pour la comparaison entre LA-ICP-MS et ANRC sont pour l'essentiel des monnaies médiévales françaises : des deniers carolingiens principalement, ainsi que des pièces françaises du XIII<sup>e</sup> siècle. Ces monnaies sont toutes particulièrement fines. Des mesures effectuées par nos soins sur plusieurs

dizaines d'entre elles ont révélé des épaisseurs comprises entre 0,2 mm et 1 mm selon les échantillons et selon l'endroit de la mesure sur un même échantillon.



**Figure 60** - Image d'une coupe de monnaie carolingienne par microscopie électronique à balayage en mode électrons secondaires.

La variabilité de l'épaisseur de ces pièces d'un endroit à l'autre sur un même échantillon est également significative. La Figure 60 illustre ce propos. Il s'agit de l'image d'une coupe de monnaie carolingienne obtenue par microscopie électronique à balayage en mode électrons secondaires. Les mesures présentées sur cette image montrent que l'épaisseur de l'alliage sur une même monnaie peut varier du simple au triple, de 220 µm au minimum jusqu'à 650 µm au maximum pour cet échantillon. La Figure 60 semble montrer que la variabilité importante de l'épaisseur des monnaies d'un point à un autre s'explique par l'épaisseur des reliefs des gravures des légendes : celles-ci sont en effet très profondes en comparaison avec l'épaisseur du flan sur lequel elles sont apposées.

Au-delà de la variabilité de l'épaisseur de ces pièces pour un même échantillon, c'est la faible épaisseur de l'ensemble des monnaies utilisées pour la comparaison entre LA-ICP-MS et ANRC qui doit ici être considérée. L'épaisseur moyenne des monnaies médiévales étudiées est de l'ordre de 500 µm.

Les pièces d'argent présentent des couches de surface perturbées dont la teneur en argent est supérieure à celle de l'alliage sain. Ces couches superficielles peuvent atteindre voire excéder une épaisseur de 200 µm sur chaque face. Pour des monnaies très fines, cette épaisseur représente une proportion importante de l'ensemble de l'alliage.

L'ANRC fournit des teneurs globales déterminées sur l'ensemble d'un échantillon. Cela signifie qu'une moyenne est calculée entre la teneur de l'élément considéré dans l'alliage sain et celle dans la couche de surface perturbée. Pour des monnaies particulièrement fines comme celles analysées pour la comparaison entre LA-ICP-MS et ANRC, la proportion de l'alliage qui a vu sa teneur en argent augmenter en surface représente une proportion non négligeable de l'ensemble de l'alliage. En conséquence, la teneur moyenne en argent déterminée par ANRC surestime la teneur de l'alliage sain ; c'est ce qui est observé sur les Figures 59a et 59b.

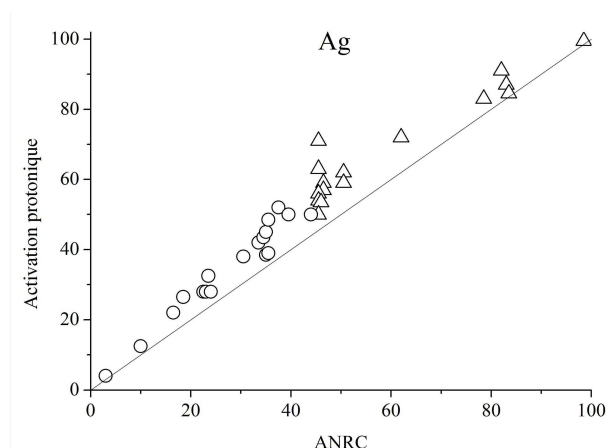
La surestimation du titre d'argent des monnaies par ANRC est principalement influencée par le rapport entre le volume d'alliage perturbé et le volume total de l'échantillon : une couche d'enrichissement de surface de 200 µm d'épaisseur sera la source d'une surestimation importante du titre d'argent pour une monnaie dont l'épaisseur moyenne est inférieure à 1 mm ; l'erreur causée par une telle couche sera en revanche négligeable pour une monnaie de plusieurs millimètres d'épaisseur comme il en circulait par exemple à l'époque romaine.

L'hypothèse d'une surestimation du titre de l'alliage sain par une méthode globale est confirmée par les études antérieures : des écarts de 10 % à 15 % ont été mesurés entre analyse globale chimique et analyse de l'alliage sain sur coupe (Guey, 1965).

Les écarts observés pour les teneurs en argent lors de la comparaison des résultats obtenus par LA-ICP-MS et par ANRC s'expliquent par une surestimation de la valeur réelle par la méthode globale. Les différences observées ne proviennent donc pas d'une erreur de la nouvelle méthode développée. Au contraire, les différences mises en évidence entre les deux méthodes soulignent la pertinence de l'analyse des monnaies d'argent en profils de concentration par LA-ICP-MS pour en déterminer le titre réel. C'est la nature de l'analyse par ANRC qui, dans des cas comme ceux qui ont été étudiés, entraîne une surestimation sensible de la teneur en argent. La méthode LA-ICP-MS semble donc constituer la réponse la plus fiable pour l'analyse de l'argent dans les monnaies anciennes.

Des écarts similaires à ceux observés sur les Figures 59a et 59b avaient été mis en évidence par le passé pour des monnaies dites d'argent mais constituées majoritairement de cuivre (Basutçu, 1980), et plus récemment sur des échantillons plus riches en argent (Teboulbi *et al.*, 2008).

Les résultats obtenus dans ces deux études antérieures sont repris ici et présentés sur la Figure 61. Il s'agissait de la comparaison entre les résultats obtenus pour de mêmes échantillons après une analyse globale par ANRC et l'analyse d'une couche superficielle de 200 µm par activation protonique.



**Figure 61** - Comparaison des teneurs en argent déterminées par ANRC et par activation protonique. Toutes les teneurs sont exprimées en pourcents. D'après Basutçu, 1980 (cercles) et Teboulbi, 2008 (triangles).

Les valeurs présentées montrent une corrélation relativement bonne pour les quelques monnaies dont le titre d'argent est supérieur à 80 % ; de même, les analyses de deux exemplaires qui contiennent moins de 20 % d'argent sont en bon accord.

Des différences importantes apparaissent pour certaines monnaies dont la teneur en argent est comprise entre 20 % et 80 %. En particulier, les analyses par activation protonique ont révélé des titres d'argent compris entre 50 % et 65 % pour un groupe de monnaies, tandis que ceux déterminés par ANRC sont de l'ordre de 45 % à 50 %.

C'est ici encore l'enrichissement de surface qui est à l'origine des différences observées. L'analyse d'une couche superficielle de 200  $\mu\text{m}$  seulement par activation protonique est tout à fait inadaptée pour des monnaies d'argent : l'analyse par cette méthode peut ne prendre en compte que la couche de surface enrichie en argent.

Les teneurs en argent déterminées par ANRC dans ces deux études peuvent être considérées comme justes dans la mesure où les échantillons pris en compte sont particulièrement épais. La contribution de la couche de surface enrichie en argent est donc négligeable par rapport à l'ensemble de la monnaie pour la plupart d'entre elles.

L'examen de la Figure 61 semble montrer que les écarts les plus importants entre les teneurs en argent déterminées par ANRC et par activation protonique concernent les monnaies de composition « intermédiaire ». Les alliages plutôt riches en argent ou en cuivre présentent en effet des différences plus faibles que ceux qui contiennent autour de 50 % de chacun de ces deux métaux.

C'est également ce qui semble se dessiner sur les Figures 59a et 59b : les écarts les plus importants entre LA-ICP-MS et ANRC concernent les monnaies qui contiennent entre 20 % et 80 % d'argent. La similarité entre les graphiques qui comparent d'une part LA-ICP-MS et ANRC, et d'autre part ANRC et activation protonique, confirme que c'est l'enrichissement en argent de la surface des monnaies qui est à l'origine des écarts observés entre LA-ICP-MS et ANRC. C'est donc bien l'ANRC qui surestime le titre des monnaies dans les cas pour lesquels une différence apparaît.

Une analyse en profils de concentration par LA-ICP-MS est donc préférable à toute autre approche : cette méthode est la seule qui permette de visualiser l'évolution de la teneur en argent au cours de l'analyse, et donc de s'affranchir d'un éventuel enrichissement de surface. L'analyse en profils de concentration permet une confiance dans les résultats que n'offrent pas les méthodes qui fournissent une unique valeur de titre dont la validité par rapport à la réalité de l'échantillon ne peut être vérifiée.

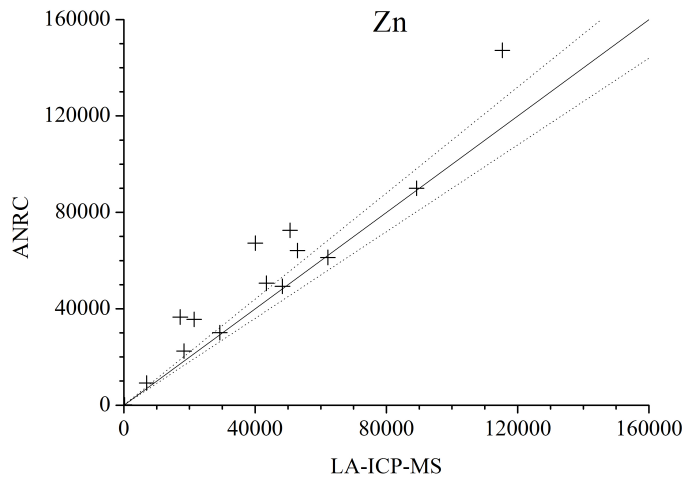
## **2. Les autres éléments dosés par les deux méthodes**

Six des éléments mineurs et traces analysés par LA-ICP-MS ont également pu être dosés par ANRC : Zn, As, Sn, Sb, Au et Pb. Les résultats obtenus par ces deux méthodes ont ainsi pu être comparés.

### ***a. Le zinc***

Les teneurs en zinc des monnaies anciennes analysées par LA-ICP-MS et par ANRC sont pour l'essentiel relativement faibles. Plus de 40 % d'entre elles contiennent en effet moins de 100 ppm de cet élément.

Les mesures de spectrométrie gamma telles qu'elles ont été pratiquées pour l'analyse par ANRC n'ont pas permis de doser les teneurs en zinc inférieures à 1 %. Des contraintes liées au partage du dispositif de mesure de spectrométrie gamma avec d'autres utilisateurs n'ont en effet pas permis de réaliser une mesure supplémentaire et relativement longue grâce à laquelle des teneurs plus faibles auraient pu être déterminées. Seules les teneurs en zinc très élevées ont donc pu être comparées, soit treize valeurs.



**Figure 62** - Comparaison des teneurs en zinc déterminées par LA-ICP-MS et par ANRC. En trait plein, la première bissectrice d'équation  $y=x$ . En pointillés, les droites représentant un écart de 10 % relatifs. Toutes les teneurs sont exprimées en ppm.

La Figure 62 présente les résultats obtenus par LA-ICP-MS et par ANRC. L'examen de ce graphique montre une corrélation satisfaisante entre les deux méthodes. L'écart relatif entre les teneurs déterminées par LA-ICP-MS et par ANRC est inférieur à 10 % ou proche de cette valeur pour près de 55 % des monnaies analysées. Pour les autres, les écarts sont plus importants mais les ordres de grandeur sont respectés. On notera que les teneurs déterminées par ANRC sont plus élevées que celles de l'analyse par LA-ICP-MS pour les monnaies qui présentent un écart sensible entre les deux méthodes.

L'analyse du zinc par LA-ICP-MS semble relativement précise pour les teneurs élevées. La comparaison avec l'ANRC n'est certes pas possible pour les concentrations plus faibles, mais la bonne cohérence entre les teneurs déterminées dans les deux menus d'analyse par LA-ICP-MS montre qu'une continuité existe pour la mesure de teneurs inférieures.

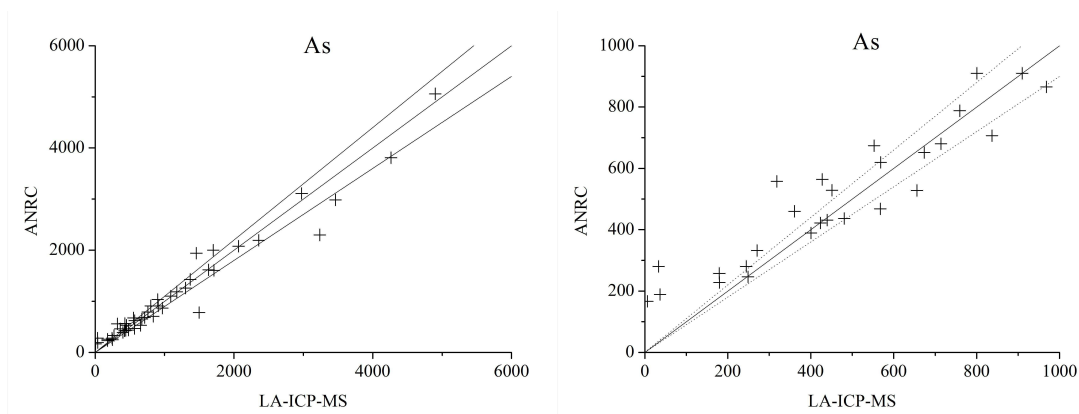
### ***b. L'arsenic***

Les conditions opératoires utilisées pour l'analyse des monnaies par ANRC permettent un dosage de l'arsenic pour des teneurs supérieures à 200 ppm environ. Quarante teneurs déterminées par cette méthode ont ainsi pu être comparées à celles obtenues par LA-ICP-MS.

La comparaison des teneurs en arsenic déterminées par les deux méthodes considérées apparaît sur les Figures 63a et 63b sur lesquelles sont reportées



l'intégralité des valeurs pour la première et celles inférieures à 1000 ppm pour la seconde.



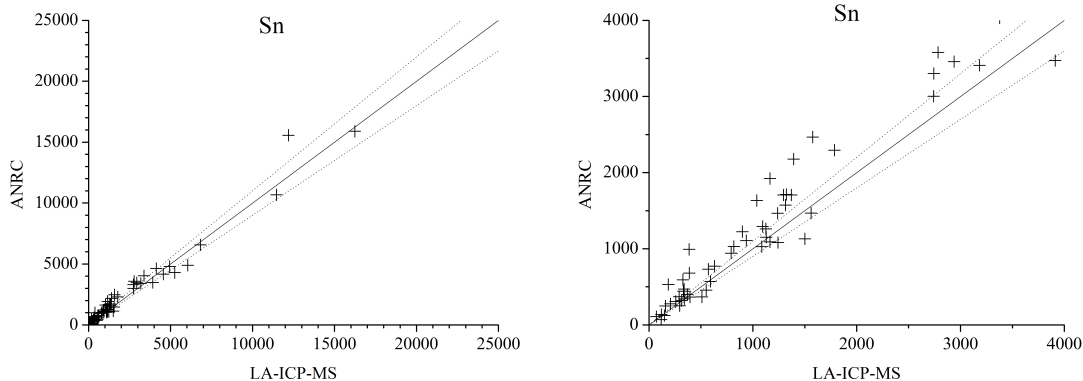
**Figures 63a et 63b** - Comparaison des teneurs en arsenic déterminées par LA-ICP-MS et par ANRC. En trait plein, la première bissectrice d'équation  $y=x$ . En pointillés, les droites représentant un écart de 10 % relatifs. Toutes les teneurs sont exprimées en ppm.

Les deux figures présentées montrent une bonne cohérence entre les teneurs en arsenic déterminées par LA-ICP-MS et par ANRC (Figures 63a et 63b). Les écarts relatifs entre les deux méthodes sont inférieurs à 10 % ou légèrement supérieurs pour la plupart des échantillons.

Le dosage de l'arsenic par LA-ICP-MS est en bon accord avec l'ANRC, ce qui suggère que le protocole d'analyse développé permet d'obtenir des teneurs justes pour l'arsenic.

### *c. L'étain*

La comparaison entre les teneurs en étain obtenues par LA-ICP-MS et par ANRC est présentée sur les Figures 64a et 64b. La première rassemble la totalité des valeurs déterminées par chacune des deux méthodes, tandis que la seconde est un agrandissement qui concerne les teneurs inférieures à 5000 ppm.

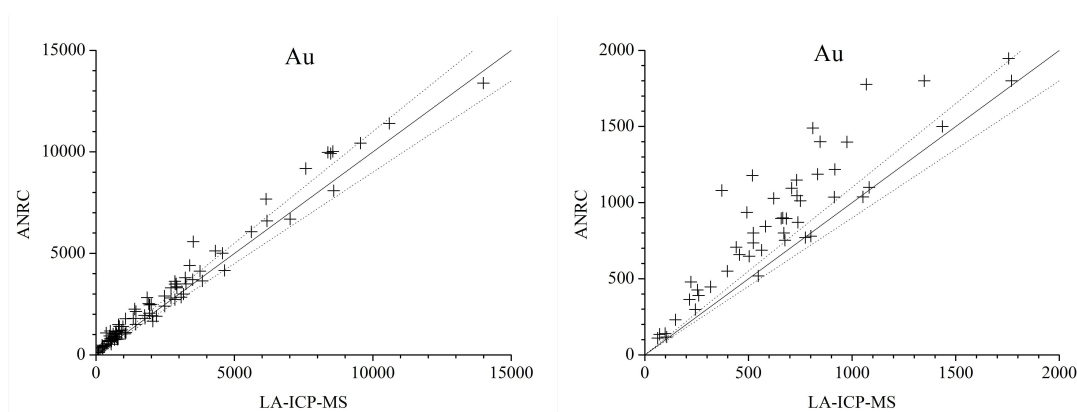


**Figures 64a et 64b** - Comparaison des teneurs en étain déterminées par LA-ICP-MS et par ANRC. En trait plein, la première bissectrice d'équation  $y=x$ . En pointillés, les droites représentant un écart de 10 % relatifs. Toutes les teneurs sont exprimées en ppm.

La corrélation entre les teneurs en étain déterminées par LA-ICP-MS et par ANRC est bonne. Les teneurs sont le plus souvent du même ordre de grandeur. L'analyse de l'étain par LA-ICP-MS semble donc représentative et juste.

#### *d. L'or*

Les teneurs en or ont également pu être déterminées par LA-ICP-MS et par ANRC. La représentation graphique de ces teneurs apparaît sur les Figures 65a et 65b.



**Figures 65a et 65b** - Comparaison des teneurs en or déterminées par LA-ICP-MS et par ANRC. En trait plein, la première bissectrice d'équation  $y=x$ . En pointillés, les droites représentant un écart de 10 % relatifs. Toutes les teneurs sont exprimées en ppm.

L'examen de ces deux figures montre une bonne corrélation entre les teneurs en or calculées par LA-ICP-MS et par ANRC, en particulier pour les valeurs élevées supérieures à 2000 ppm.

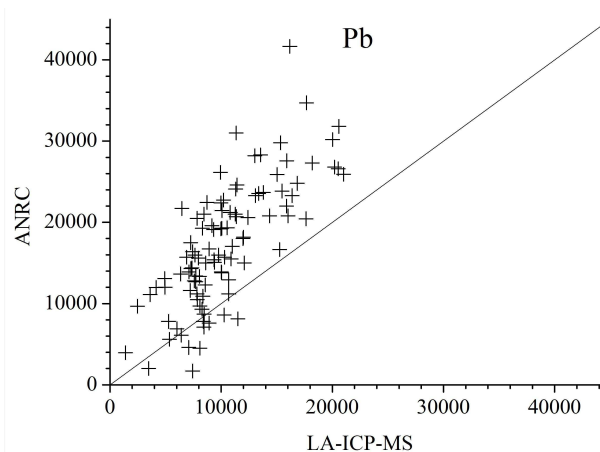
Pour les teneurs inférieures, un léger écart systématique peut être observé entre les deux méthodes. Les valeurs déterminées par ANRC sont en effet

supérieures à celles obtenues par LA-ICP-MS d'environ 10 % relatifs. Les ordres de grandeurs sont néanmoins respectés, et cette comparaison de méthodes montre une bonne justesse dans le dosage de l'or par LA-ICP-MS.

Un point n'apparaît pas sur les Figures 65a et 65b afin d'en faciliter la lecture. Il s'agit d'une monnaie dont la teneur en or est extrêmement élevée : les valeurs déterminées par LA-ICP-MS et par ANRC sont respectivement de 6,6 % et de 6,3 %. Le bon accord entre ces deux teneurs confirme la justesse de l'analyse de l'or par LA-ICP-MS, et ce même pour les concentrations très élevées.

#### *e. Le plomb*

Le plomb est le dernier élément qu'il est possible d'analyser par LA-ICP-MS comme par ANRC. La Figure 66 présente sous forme graphique la comparaison des teneurs en plomb déterminées dans les monnaies d'argent par ces deux méthodes.



**Figure 66** - Comparaison des teneurs en plomb déterminées par LA-ICP-MS et par ANRC. En trait plein, la première bissectrice d'équation  $y=x$ . Toutes les teneurs sont exprimées en ppm.

Des écarts importants apparaissent entre les teneurs en plomb calculées par les deux méthodes considérées. Les valeurs déterminées par ANRC sont d'une manière générale supérieures à celles obtenues par LA-ICP-MS.

Un alignement des points sur une autre droite que la première bissectrice, qui signifierait un écart systématique entre les deux méthodes, ne peut être observé. Les écarts semblent augmenter quand la concentration devient plus importante, mais les valeurs sont plutôt dispersées : des teneurs en plomb très différentes sont en effet calculées par ANRC pour des monnaies pour lesquelles l'analyse par LA-ICP-MS a révélé des valeurs similaires. Des écarts de plus de 100 % relatifs peuvent être observés.

Deux hypothèses peuvent être considérées pour expliquer les écarts entre les teneurs en plomb déterminées par LA-ICP-MS et par ANRC.

La première tient à la répartition du plomb dans les alliages à base d'argent. Le plomb forme des nodules au sein de la matrice d'argent lors du refroidissement de l'alliage. Cela pourrait être la cause de variabilités importantes de la teneur en plomb au sein des alliages monétaires. La formation de ces nodules pourrait donc entraîner une incertitude sur le dosage du plomb par une méthode d'analyse ponctuelle comme c'est le cas en LA-ICP-MS.

La seconde est l'interférence du radio-isotope de l'argent dont l'énergie de désintégration est identique à celle mesurée pour le plomb. Cette hypothèse est confirmée par la comparaison entre les teneurs en plomb certifiées ou attendues et celles calculées par ANRC, qui fait apparaître des écarts importants. Cette interférence dépend de la teneur en argent dans l'alliage. Cela explique que l'écart entre les teneurs en plomb n'est pas systématique, mais relativement variable bien que les valeurs déterminées par ANRC soient le plus souvent supérieures. Il semble que l'écart entre ANRC et LA-ICP-MS pour le plomb soit imputable à la méthode d'analyse globale. Il est donc légitime de supposer que les teneurs déterminées par LA-ICP-MS sont les plus justes.

## **VI. Limitations**

La principale limitation pour l'analyse des monnaies anciennes à base d'argent par LA-ICP-MS est liée à la structure interne des alliages. Des hétérogénéités de composition, ou une corrosion très profonde qui affecte l'ensemble de l'objet, peuvent entraîner une variabilité importante des teneurs sur les profils de concentration. Si aucun des trois ou quatre profils ne présente de palier de stabilité suffisant pour permettre de calculer une composition, une autre méthode d'analyse devra être employée. L'ANRC, malgré sa propension à surestimer le titre d'argent pour certaines monnaies fines, fournira une composition globale approximative sinon juste, qui permettra d'inclure les échantillons concernés à l'ensemble du *corpus* considéré pour l'interprétation historique des résultats.

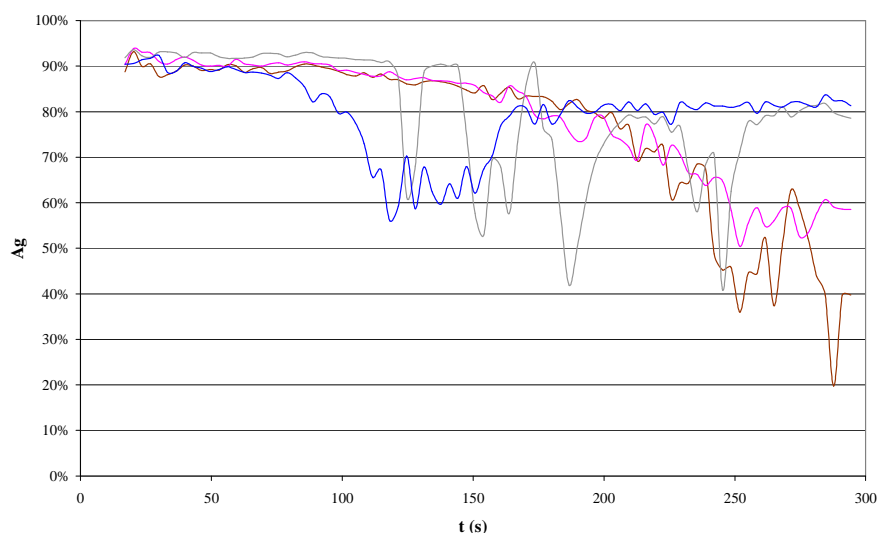
C'est dans de tels cas que la complémentarité entre LA-ICP-MS et ANRC est remarquable. Car si la première méthode ne permet pas de déterminer les teneurs des constituants de ces monnaies, l'analyse en profils de concentration renseigne sur la structure des alliages. La seconde, certes moins juste pour les échantillons qui présentent une couche de surface perturbée d'épaisseur importante, se révèle très utile car elle permet d'obtenir la composition moyenne de la

monnaie. Deux informations de type différent sont ainsi obtenues. Leur confrontation permet pour ces monnaies une meilleure compréhension de chaque échantillon.

Les cas de fluctuation importante des profils de concentration concernent le plus souvent les monnaies de titre relativement faible. Parmi les échantillons analysés dans le cadre de cette thèse, ce sont essentiellement ceux d'un titre global inférieur à 70 % pour lesquels l'analyse par LA-ICP-MS en profils de concentration s'est avérée inadaptée.

Il est cependant certains cas pour lesquels l'analyse ponctuelle par LA-ICP-MS ne permet pas, pour des échantillons de très bon titre d'argent, d'obtenir des données représentatives de l'ensemble de l'alliage monétaire. L'exemple le plus frappant est celui de la monnaie Prou 700 (Figure 67).

Trois premières analyses en profils de concentration ont d'abord été effectuées sur cette pièce comme c'est le cas pour chaque échantillon. Les trois profils obtenus pour l'argent se sont révélés trop fluctuants pour permettre le calcul d'une teneur. Une quatrième analyse a donc été effectuée ; la variabilité importante des teneurs calculées sur la durée de l'analyse a été confirmée par cette analyse supplémentaire. L'analyse par LA-ICP-MS en profils de concentration s'est donc avérée inadaptée pour cet échantillon.



**Figure 67** - Profils de concentration de l'argent obtenus par LA-ICP-MS pour l'échantillon Prou 700.

L'analyse globale de Prou 700 par ANRC a révélé un titre d'argent de 90,6 %. Un réexamen des profils obtenus par LA-ICP-MS montre en effet une cohérence des quatre courbes pour les soixante à cent premières secondes : tous les profils de

l'argent pour cet échantillon présentent un plateau relativement stable autour de 90 % au début de l'ablation laser. Néanmoins, ces profils ne sont pas suffisants à eux seuls pour permettre de proposer une teneur en argent pour cette monnaie. Une analyse complémentaire par une méthode globale comme l'ANRC est indispensable pour obtenir un titre moyen.

De tels cas d'hétérogénéités sont toutefois extrêmement rares : la monnaie Prou 700 est la seule, parmi toutes celles analysées dont le titre est supérieur à 90 %, à présenter de telles hétérogénéités. Les cas pour lesquels les profils de concentration sont inexploitable du fait d'une grande variabilité deviennent plus fréquents à mesure que le titre des monnaies diminue ; l'exemple de Prou 700 montre toutefois que les pièces de bas titre ne sont pas les seules susceptibles de présenter des hétérogénéités importantes dans la répartition des éléments majeurs. Il convient donc de rester vigilant quant à l'homogénéité des monnaies analysées par LA-ICP-MS, et ce même si les connaissances historiques et les analyses antérieures d'échantillons similaires peuvent laisser penser que leur titre est très élevé.

## **D. Bilan de l'analyse des monnaies d'argent par LA-ICP-MS**

L'application de la méthode LA-ICP-MS aux monnaies d'argent constitue une réussite et un progrès incontestables. La combinaison des caractéristiques intrinsèques de cette méthode avec les spécificités des monnaies d'argent permet une analyse plus fiable et plus juste d'un nombre d'éléments largement supérieur, en comparaison avec les méthodes employées par le passé.

L'analyse des éléments majeurs et, dans certains cas, des principaux éléments mineurs en profils de concentration, constitue la principale innovation du protocole défini. Cette approche permise par l'ablation progressive de la matière par le laser est la seule qui permette de s'affranchir de l'enrichissement de surface des monnaies. La visualisation de l'évolution des concentrations de ces éléments sur des profils de concentration, et la possibilité de comparer entre eux les profils obtenus sur un même échantillon, constituent une excellente garantie pour un dosage fiable des éléments majeurs : la reproductibilité des analyses effectuées en différents endroits permet de s'assurer de la représentativité des micro-prélèvements.

Les caractéristiques du dosage des éléments mineurs et traces par LA-ICP-MS constituent également une avancée par rapport à celles des méthodes utilisées par le passé pour l'analyse des monnaies d'argent. Le nombre d'éléments qu'il est possible d'analyser est tout d'abord nettement supérieur ; les limites de détection très basses permettent, de plus, d'étudier des teneurs très faibles pour certains de ces éléments pour des études de provenance. La reproductibilité du dosage de la plupart des éléments mineurs et traces analysés est satisfaisante sinon excellente. Parmi les vingt-trois éléments mesurés, deux ne peuvent être dosés avec précision : le fer et le mercure. L'intérêt de ces deux éléments pour les études de provenance n'a toutefois pas été démontré à ce jour. L'incertitude qui caractérise leur analyse par LA-ICP-MS n'est donc pas dommageable pour les études de provenance qui impliquent des éléments-traces.

Les analyses effectuées dans le cadre de cette thèse ont porté essentiellement sur des monnaies dont le titre d'argent est relativement élevé : la plupart d'entre elles contient en effet plus de 70 % de cet élément. Les essais réalisés sur des alliages de titre plus faible ont montré que l'analyse par LA-ICP-MS peut être une approche inadaptée pour certains échantillons. Dans la majorité des cas cependant, une composition a pu être déterminée, et la comparaison avec l'ANRC pour ces échantillons a montré une bonne cohérence entre les deux méthodes. Des analyses supplémentaires sur un nombre de monnaies plus important sont toutefois nécessaires pour confirmer ces premières observations.

Deux principales limitations caractérisent la méthode LA-ICP-MS pour l'analyse de matériaux solides en général : le fractionnement isotopique et l'hétérogénéité des échantillons. Le fractionnement isotopique semble négligeable malgré la durée d'acquisition définie pour le menu d'analyse des éléments majeurs. Les rapports de signaux entre les différents éléments dosés et celui de l'argent sont proportionnels avec les rapports de leurs concentrations. Le ratio diamètre/profondeur relativement faible des cratères d'ablation permet de maintenir un fractionnement isotopique négligeable. Le caractère ponctuel de l'analyse par LA-ICP-MS peut en revanche s'avérer problématique dans le cas d'alliages dont la structure n'est pas homogène. La composition de certains échantillons n'a en effet pas pu être déterminée du fait de profils de concentration trop fluctuants. Ces cas restent cependant relativement rares ; la limitation liée à l'hétérogénéité de certains alliages est donc largement compensée par les avantages et innovations de la méthode LA-ICP-MS et du protocole analytique développé.

Dans une des premières publications ayant traité du phénomène d'enrichissement de surface des monnaies d'argent, Condamin et Picon ont écrit: « *D'une part l'enrichissement superficiel [...] a une incidence sur les résultats d'analyse superficielle, d'autre part par un phénomène d'enrichissement possible en profondeur amène une non-coïncidence entre titre global actuel et titre primitif. Or, de ce dernier phénomène, aucune méthode ne peut s'affranchir, pas plus les méthodes non destructives que les autres.* » (Condamin et Picon, 1964a). Plus de quarante ans après, l'analyse par LA-ICP-MS apporte une solution à cette problématique. L'enrichissement en argent de la surface des monnaies d'argent ne constitue plus une limitation pour l'analyse de ces objets. Les résultats obtenus par LA-ICP-MS constituent de ce fait la base la plus solide pour l'interprétation historique qui est la véritable finalité de l'analyse de pièces anciennes.

La principale perspective à explorer est la modélisation de la corrélation entre durée de l'ablation laser et la profondeur atteinte. Des essais ont été effectués dans le cadre de cette thèse afin d'obtenir un ordre de grandeur. Cette voie n'a pas été explorée davantage car cette problématique n'est pas essentielle pour l'analyse des monnaies d'argent. Une étude complète de cette question pourrait toutefois apporter de nouvelles informations sur la structure interne de ces alliages.



# Liste des références de la première partie

- Akerman, J.Y., 1834. A descriptive Catalogue of rare and unedited Roman Coins. From the earliest period of the Roman coinage, to the extinction of the Empire under Constantinus Paleologos, Effingham Wilson, Royal Exchange, London.
- Arles, A., 2008. Les techniques de monnayage médiéval dans un cadre officiel et illégal par une approche métrologique, archéométrique et expérimentale, Université d'Orléans, 2 Vol., Orléans.
- Arles, A., Piccardo, P. et Téreygeol, F., 2005. Le procédé de blanchiment dans les ateliers monétaires français au XVI<sup>ème</sup> siècle : approche archéométrique et expérimentale. In, Craft treatises and handbooks, Cordoba.
- Arrowsmith, P., 1987. Laser ablation of solids for elemental analysis by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analytical Chemistry*, 59 (10), p. 1437-1444.
- Barrandon, J.-N., 1978. Utilisation de réactions nucléaires induites par les protons pour l'étude des monnaies d'argent et d'or. *Revue d'Archéométrie*, 2, p. 105-120.
- Barrandon, J.-N., 1980. Analyse par activation et numismatique. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 55 (2), p. 317-327.
- Barrandon, J.-N., 1984. Détermination du titre des monnaies d'argent par analyse par activation au moyen des neutrons rapides. *Revue d'Archéométrie*, 8, p. 61-69.
- Barrandon, J.-N., Callu, J.-P. et Brenot, C., 1977. The analysis of Constantinian coins (A. D. 313-340) by non-destructive Californium 252 activation analysis. *Archaeometry*, 19 (2), p. 173-186.
- Barrandon, J.-N., Debrun, J.-L. et Hours, M., 1973a. Application des méthodes nucléaires dans le domaine de l'art. In, Proc. Accademia Nazionale dei Lincei, Rome-Venise, p. 77-85.
- Barrandon, J.-N., Debrun, J. et Kohn, A., 1973b. Etude du dosage de 30 éléments par activation dans les protons de 11 MeV. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 16 (2), p. 617-626.

- Barrandon, J.-N., Guerra, M.F., Collin, B., Le Roy Ladurie, E. et Morrisson, C., 1991. The diffusion of the silver from Potosi in the XVI<sup>th</sup> century European coinage. In: E. Pernicka et G.A. Wagner (Editeurs), *Archaeometry* 90, Heidelberg, p. 11-18.
- Barrandon, J.-N., Guerra, M.F., Le Roy Ladurie, E., Morrisson, C. et Collin, B., 1992. La diffusion de l'argent du Potosi dans le monnayage européen à partir du XVI<sup>ème</sup> siècle. *Gaceta Numismatica*, 197, p. 15-22.
- Barrandon, J.-N., Guerra, M.F. et Magro, F.A., 1988. Chemical compositions of portuguese dinheiros. In: M.G. Marques et D.M. Metcalf (Editeurs), *Problems of Medieval Coinage in the Iberian Area*, p. 343-372.
- Basutçu, M., 1980. Contribution à l'analyse par réactions nucléaires à l'aide de particules alpha de basse énergie (<3,5 MeV). Etude comparative du dosage de l'argent par des réactions nucléaires non destructives en numismatique, Paris 6, Paris, 166 p.
- Beauchesne, F. et Barrandon, J.-N., 1986. Analyse globale et non destructive des objets archéologiques cuivreux par activation avec des neutrons rapides de cyclotron. *Revue d'Archéométrie*, 10, p. 75-85.
- Beck, L., Alloin, E., Berthier, C., Réveillon, S. et Costa, V., 2008. Silver surface enrichment controlled by simultaneous RBS for reliable PIXE analysis of ancient coins. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 266 (10), p. 2320-2324.
- Beck, L., Bosonnet, S., Réveillon, S., Eliot, D. et Pilon, F., 2004. Silver surface enrichment of silver-copper alloys: a limitation for the analysis of ancient silver coins by surface techniques. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 226 (1-2), p. 153-162.
- Bian, Q., Garcia, C.C., Koch, J. et Niemax, K., 2006. Non-matrix matched calibration of major and minor concentrations of Zn and Cu in brass, aluminium and silicate glass using NIR femtosecond laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 21 (2), p. 187-191.
- Bleiner, D. et Bogaerts, A., 2006. Computer simulations of laser ablation sample introduction for plasma-source elemental microanalysis. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 21 (11), p. 1161-1174.
- Bleiner, D. et Günther, D., 2001. Theoretical description and experimental observation of aerosol transport processes in laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 16 (5), p. 449-456.
- Blet, M., 1999. L'apport de l'ablation laser couplée à l'ICP-MS à la caractérisation des archéomatériaux siliceux, Université d'Orléans, Orléans, 217 p.

- Bogaerts, A., Chen, Z. et Bleiner, D., 2006. Laser ablation of copper in different background gases: comparative study by numerical modeling and experiments. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 21 (4), p. 384-395.
- Brambilla, C., 1883. *Monete di Pavia, raccolte ed ordinatamente dichiarate da Camillo Brambilla, Pavia*, 502 p.
- Brenot, C. et Barrandon, J.-N., 1988. Les émissions de bronze à Marseille : apport des analyses I. Les bronzes lourds. *Revue Numismatique*, 30, p. 91-113.
- Brissaud, I., Chevallier, P., Dardenne, P., Deschamps, N., Frontier, J.P., Gruel, K., Taccoen, A., Tarrats, A. et Wang, J.X., 1990. Analysis of Gaulish Coins by Proton Induced X-Ray Emission, Synchrotron Radiation X-Ray Fluorescence and Neutron Activation Analysis. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, 49, p. 305-308.
- Carter, G.F., 1964. Preparation of ancient coins for accurate X-ray fluorescence analysis. *Archaeometry*, 7 (1), p. 106-113.
- Carter, G.F., 1973. Reproducibility of X-ray fluorescence analyses of Septimius Severus Denarii. *Archaeometry*, 15, p. 67-73.
- Carter, G.F., 1998. Coin Analyses by Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence (WDXRF). In: W.A. Oddy et M.R. Cowell (Editeurs), *Metallurgy in Numismatics*. Royal Numismatic Society, London, p. 425-439.
- Civici, N., Gjonecaj, Sh., Stamati, F., Dilo, T., Pavlidou, E., Polychroniadis, E.K. et Smit, Z., 2007. Compositional study of III<sup>rd</sup> century BC silver coins from Kreshpan hoard (Albania) using EDXRF spectrometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 258 (2), p. 414-420.
- Clairand, A. et Kind, J.-Y. (Editeurs), 2000. *Le traité des monnaies de Jean Boizard d'après l'édition de Paris de 1692*. Documents d'Histoire Monétaire. K&C, 242 p.
- Coedo, A.G., Dorado, T., Padilla, I. et Fariñas, J.C., 2005. Depth profile analysis of copper coating on steel using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 20 (7), p. 612-620.
- Condamin, J. et Picon, M., 1964a. Etude de quelques problèmes analytiques propres aux monnaies antiques (argent, cuivre). *Revue Numismatique*, 6 (6), p. 69-89.
- Condamin, J. et Picon, M., 1964b. The Influence of Corrosion and Diffusion on the Percentage of Silver in Roman Denarii. *Archaeometry*, 7 (1), p. 98-105.
- Condamin, J. et Picon, M., 1965. Notes on Diffusion in Ancient Alloys. *Archaeometry*, 8 (1), p. 110-114.

- Condamin, J. et Picon, M., 1972. Changes Suffered by Coins in the Course of Time and the Influence of these on the Results of Different Methods of Analysis. In: E.T. Hall et D.M. Metcalf (Editeurs), *Methods of Chemical and Metallurgical Investigation of Ancient Coinage*. Royal Numismatic Society, London, p. 49-66.
- Cope, L.H., 1972. Surface-silvered ancient coins. In: E.T.Hall et D.M. Metcalf (Editeur), *Methods of Chemical and Metallurgical Investigations of Ancient Coinage*. Royal Numismatic Society, London, p. 261-278.
- Cowell, M., 1998. Coin Analysis by Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry. In: W.A.Oddy et M.R. Cowell (Editeurs), *Metallurgy in Numismatics* Royal Numismatics Society, London, p. 448-460.
- Cowell, M.R. et Lowick, N.M., 1988. Silver from the Panjhir mines. In: A. Oddy (Editeur), *Metallurgy in Numismatics*. Royal Numismatic Society, Londres, p. 65-74.
- Devos, W., Moor, C. et Lienemann, P., 1999. Determination of impurities in antique silver objects for authentication by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 14 (4), p. 621-626.
- Devos, W., Senn-Luder, M., Moor, C. et Salter, C., 2000. Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) for spatially resolved trace analysis of early-medieval archaeological iron finds. *Fresenius'Journal of Analytical Chemistry*, 366 (8), p. 873-880.
- Dussubieux, L., Deraisme, A., Frot, G., Stevenson, Ch., Creech, A. et Bienvenu, Y., 2008. LA-ICP-MS, SEM-EDS and EPMA analysis of Eastern North American copper-based artefacts: impact of corrosion and heterogeneity on the reliability of the LA-ICP-MS compositional results. *Archaeometry*, 50 (4), p. 643-657.
- Dussubieux, L. et van Zelst, L., 2004. LA-ICP-MS analysis of platinum-group elements and other elements of interest in ancient gold. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 79 (2), p. 353-356.
- Emeleus, V.M., 1958. Gold and Silver Traces in Early Greek Silver. *Archaeometry*, 1, p. 1-5.
- Flament, C. et Marchetti, P., 2004. Analysis of ancient silver coins. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 226 (1-2), p. 179-184.
- Gilmore, G.R., 1998. Neutron Activation Using a Reactor. In: A.Oddy et .M. Cowell (Editeurs), *Metallurgy in Numismatics*. Royal Numismatic Society, London, p. 1-14.

- Gondonneau, A. et Guerra, M.F., 2002. The circulation of precious metals in the Arab Empire: the case of the near and the Middle East. *Archaeometry*, 44 (4), p. 573-599.
- Gondonneau, A., Guerra, M.F. et Barrandon, J.-N., 1996. Sur les traces de l'or monnayé : Recherche de provenances par LA-ICP-MS. *Revue d'Archéométrie* (20), p. 23-32.
- Gordus, A.A., 1967. Quantitative non-destructive neutron activation analysis of silver in coins. *Archaeometry*, 10 (1), p. 78-86.
- Gordus, A.A., 1972. Neutron Activation Analysis of Coins and Coin-streaks. In: E.T. Hall et D.M. Metcalf (Editeurs), *Methods of Chemical and Metallurgical Investigation of Ancient Coinage*. Royal Numismatic Society, London, p. 127-148.
- Gratuze, B., 1999. Obsidian Characterization by Laser Ablation ICP-MS and its Application to Prehistoric Trade in the Mediterranean and the Near East: Sources and Distribution of Obsidian within the Aegean and Anatolia. *Journal of Archaeological Science*, 26 (8), p. 869-881.
- Gratuze, B., Barrandon, J.-N., Al Isa, K. et Cauvin, M.-C., 1993a. Non-destructive analysis of obsidian artefacts using nuclear techniques: investigation of provenance of Near Eastern artefacts. *Archaeometry*, 35 (1), p. 11-21.
- Gratuze, B., Blet-Lemarquand, M. et Barrandon, J.-N., 2001. Mass spectrometry with laser sampling: A new tool to characterize archaeological materials. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 247 (3), p. 645-656.
- Gratuze, B., Blet-Lemarquand, M. et Barrandon, J.-N., 2004. Caractérisation des alliages monétaires à base d'or par LA-ICP-MS. *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, 59 (6), p. 163-169.
- Gratuze, B., Giovagnoli, A., Barrandon, J.-N., Telouk, P. et Imbert, J.-L., 1993b. Apport de la méthode ICP-MS couplée à l'ablation laser pour la caractérisation des archéomatériaux. *Revue d'Archéométrie* (17), p. 89-104.
- Gray, A.L., 1985. Solid sample introduction by laser ablation for inductively coupled plasma source mass spectrometry. *The Analyst*, 110 (5), p. 551-556.
- Günther, D. et Hattendorf, B., 2005. Solid sample analysis using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Trends in Analytical Chemistry*, 24 (3), p. 255-265.
- Günther, D., Horn, I. et Hattendorf, B., 2000. Recent trends and developments in laser ablation-ICP-mass spectrometry. *Fresenius'Journal of Analytical Chemistry*, 368 (1), p. 4-14.

- Guerra, M.F., 2004. The circulation of South American precious metals in Brazil at the end of the 17<sup>th</sup> century. *Journal of Archaeological Science*, 31 (9), p. 1225-1236.
- Guerra, M.F. et Barrandon, J.-N., 1998. Ion beam activation analysis with a cyclotron. In: A. Oddy et M. Cowell (Editeurs), *Metallurgy in Numismatics*. Royal Numismatic Society, London, p. 15-34.
- Guerra, M.F., Barrandon, J.N., Magro, F. et Gil, F.B., 1989. Analyse de dinheiros de la 1<sup>ère</sup> dynastie du Portugal : Nouvelles approches. *Revue d'Archéométrie*, 13, p. 31-41.
- Guerra, M.F., Sarthre, C.O., Gondonneau, A. et Barrandon, J.N., 1999. Precious Metals and Provenance Enquiries using LA-ICP-MS. *Journal of Archaeological Science*, 26 (8), p. 1101-1110.
- Guey, J., 1962. L'aloi du denier romain de 177 à 211 après J.-C. étude descriptive. *Revue Numismatique* (4), p. 73-140.
- Guey, J., 1965. Peut-on se fier aux essais chimiques ? *Revue Numismatique*, 6 (7), p. 110-122.
- Guey, J. et Condamin, J., 1961. Exploration spectrographique d'un antoninianus de Caracalla. *Revue Numismatique*, 6 (3), p. 51-73.
- Hall, E.T., 1960. X-ray Fluorescent Analysis applied to Archaeology. *Archaeometry*, 3 (1), p. 29-35.
- Hall, E.T., 1961. Surface-enrichment of buried metals. *Archaeometry*, 4: 62-66.
- Hall, E.T., Banks, M.S. et Stern, J.M., 1964. Uses of X-Ray Fluorescent Analysis in Archaeometry. *Archaeometry*, 7 (1), p. 84-89.
- Halleux, R., 1981. *Les Alchimistes grecs*. Paris: Belles Lettres, Paris.
- Hendy, M.F. et Charles, J.A., 1970. The production techniques, silver content and circulation history of the twelfth-century Byzantine Trachy. *Archaeometry*, 12 (1), p. 13-21.
- Hoefler, F., 1842. *Histoire de la Chimie*. Hachette, Paris.
- Jackson, S.E., 2000. The application of Nd: YAG lasers in LA-ICP-MS. In: P. Sylvester (Editeur), *Laser-Ablation-ICP-MS in the Earth Sciences. Principles and Applications. Short Course Series*. Mineralogical Association of Canada, Ottawa, Ontario, Canada, p. 29-45.
- Jackson, S.E. et Günther, D., 2003. The nature and sources of laser induced isotopic fractionation in laser ablation-multicollector-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 18 (3), p. 205-212.

- Jeffries, T.E., Perkins, W.T. et Pearce, N.J.G., 1995. Comparisons of infrared and ultraviolet laser probe microanalysis inductively coupled plasma mass spectrometry in mineral analysis. *The Analyst*, 120 (5), p. 1365-1371.
- Kanický, V., Kuhn, H.R. et Guenther, D., 2004. Depth profile studies of ZrTiN coatings by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 380 (2), p. 218-226.
- Klaproth, M.H., 1792. *Abhandlungen der königlichen Akademie der Wissenschaften und schonen Künste zu Berlin (1792-1797)*. In, *Experimental-Philosophie*, Berlin, p. 31-40.
- Klockenkämper, R., Bubert, H. et Hasler, K., 1999. Detection of near-surface silver enrichment on Roman imperial silver coins by X-ray spectral analysis. *Archaeometry*, 41 (2), p. 311-320.
- Kogan, V.V., Hinds, M.W. et Ramendik, G.I., 1994. The direct determination of trace metals in gold and silver materials by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry without matrix matched standards. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 49 (4), p. 333-343.
- Kraay, C.M., 1959. Gold and Silver Traces in Early Greek Silver II. *Archaeometry*, 2, p. 1-16.
- Kuhn, H.R. et Günther, D., 2003. Elemental fractionation studies in laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry on laser-induced brass aerosols. *Anal. Chem*, 75 (4), p. 747-753.
- Kuhn, H.R., Pearson, N.J. et Jackson, S.E., 2007. The influence of the laser ablation process on isotopic fractionation of copper in LA-MC-ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 22 (5), p. 547-552.
- La Niece, S., 1993. *Silvering*. In: S. La Niece et P.T. Craddock (Editeurs), *Metal plating and patination: cultural, technical, and historical developments*. Butterworth-Heinemann, Oxford ; Boston, p. 201-210.
- Le Roy Ladurie, E., Barrandon, J.-N., Collin, B., Guerra, M.F. et Morrisson, C., 1990. Sur les traces de l'argent du Potosí ? *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, 45 (2), p. 483-505.
- Lide, D., 1991. *CRC handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data, 1991-1992*. Boca Raton, CRC Press.
- Linke, R. et Schreiner, M., 2000. Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Analysis and X-Ray Microanalysis of Medieval Silver Coins. *Microchimica Acta*, 133 (1), p. 165-170.
- Linke, R., Schreiner, M. et Demortier, G., 2004. The application of photon, electron and proton induced X-ray analysis for the identification and characterisation of medieval silver coins. *Nuclear Instruments and Methods*

- in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 226 (1-2), p. 172-178.
- Linke, R., Schreiner, M., Demortier, G. et Alram, M., 2003. Determination of the provenance of medieval silver coins: potential and limitations of x-ray analysis using photons, electrons or protons. *X-Ray Spectrometry*, 32 (5), p. 373-380.
- Liu, C., Mao, X.L., Mao, S.S., Zeng, X., Greif, R. et Russo, R.E., 2004. Nanosecond and femtosecond laser ablation of brass: Particulate and ICP-MS measurements. *Analytical Chemistry*, 76 (2), p. 379-383.
- Mank, A.J.G. et Mason, P.R.D., 1999. A critical assessment of laser ablation ICP-MS as an analytical tool for depth analysis in silica-based glass samples. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 14 (8) , p. 1143-1153.
- Margetic, V., Bolshov, M., Stockhaus, A., Niemax, K. et Hergenröder, R., 2001. Depth profiling of multi-layer samples using femtosecond laser ablation. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 16 (6), p. 616-621.
- Mason, P.R.D. et Mank, A.J.G., 2001. Depth-resolved analysis in multi-layered glass and metal materials using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 16 (12), p. 1381-1388.
- McCandless, T.E., Baker, M.E. et Ruiz, J., 1997. Trace Element Analysis of Natural Gold by Laser Ablation ICP-MS: A Combined External/Internal Standardisation Approach. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 21 (2), p. 271-278.
- McKerrell, H. et Stevenson, R.B.K., 1972. Some Analyses of Anglo-Saxon and Associated Oriental Silver Coinage. In: E.T. Hall et D.M. Metcalf (Editeurs), *Methods of Chemical and Metallurgical Investigation of Ancient Coinage*. Royal Numismatic Society, Londres, p. 195-209.
- Metcalf, D.M. et Schweizer, F., 1971. The metal contents of the silver pennies of William II and Henry I (1087-1135). *Archaeometry*, 13 (2), p. 177-187.
- Meyers, P., 1969. Non-destructive activation analysis of ancient coins using charged particles and fast neutrons. *Archaeometry*, 11, p. 67-84.
- Meyers, P., van Zelst, L. et Sayre, E.V., 1973. Determination of major components and trace elements in ancient silver by thermal neutron activation analysis. *Journal of Radioanalytical Chemistry*, 16, p. 67-78.
- Meyers, P., Van Zelst, L. et Sayre, E.V., 1974. Major and Trace Elements in Sasanian Silver. In: C.W. Beck (Editeur), *Archaeological Chemistry*. American Chemical Society, Washington, p. 22-33.



- Morrisson, C., Barrandon, J.-N. et Morisson, C., 1999. Or du Brésil, Monnaie et Croissance en France au XVIIIe siècle. Cahiers Ernest-Babelon, 7. CNRS Éditions, Paris.
- Neff, H., Cogswell, J.W., Kosakowsky, L.J., Belli, F.E. et Bove, F.J., 1999. A new perspective on the relationships among cream paste ceramic traditions of southeastern Mesoamerica. *Latin American Antiquity*, 10 (3), p. 281-99.
- Neff, H., Cogswell, J.W. et Ross Jr, L.M., 2003. Supplementing bulk chemistry in archaeological ceramic provenance investigations. *Patterns and process: a Festschrift in honor of Dr. Edward V. Sayre*, p. 201-24.
- Northover, J.P., 1998. Analysis in the electron microprobe and scanning electron microscope. In: A. Oddy et M. Cowell (Editeurs), *Metallurgy in Numismatics*. Royal Numismatic Society, London, p. 94-113.
- Papadopoli, N., 1893. *Le Monete di Venezia, descritte ed illustrate da Nicolo Papadopoli*. F. Ongania, Venezia, 425 p.
- Pearce, N.J.G., Perkins, W.T., Abell, I., Duller, G.A.T. et Fuge, R., 1992. Mineral microanalysis by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 7 (1), p. 53-57.
- Perkins, W.T., Pearce, N.J.G. et Jeffries, T.E., 1993. Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry: A new technique for the determination of trace and ultra-trace elements in silicates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57 (2), p. 475-482.
- Plotnikov, A., Vogt, C., Hoffmann, V., Täschner, C. et Wetzig, K., 2001. Application of laser ablation inductively coupled plasma quadrupole mass spectrometry (LA-ICP-QMS) for depth profile analysis. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 16 (11), p. 1290-1295.
- Raith, A., Hutton, R.C., Abell, I.D. et Crighton, J., 1995. Non-destructive sampling method of metals and alloys for laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 10 (9), p. 591-594.
- Rautman, M.L., Neff, H., Gomez, B., Vaughan, S. et Glascock, M.D., 1999. Amphoras and roof-tiles from Late Roman Cyprus: a compositional study of calcareous ceramics from Kalavastos-Kopetra. *Journal of Roman Archaeology*, 12, p. 377-391.
- Schweizer, F., 1972. Analysis of Ancient Coins Using a Point Source Linear X-ray Spectrometer: A Critical Review. In: E.T. Hall et D.M. Metcalf (Editeurs), *Methods of Chemical and Metallurgical Investigation of Ancient Coinage*. Royal Numismatic Society, London, p. 153-169.
- Schweizer, F. et Friedman, A.M., 1972. Comparison of methods of analysis of silver and gold in silver coins. *Archaeometry*, 14 (1), p. 103-107.

- Smit, Z. et Kos, P., 1984. Elemental analysis of Celtic coins. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 3 (1-3), p. 416-418.
- Smit, Z. et Semrov, A., 2006. Early medieval coinage in the territory of Slovenia. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 252 (2), p. 290-298.
- Speakman, R.J., Neff, H., Glascock, M.D. et Higgins, B., 2002. Characterization of archaeological materials by LA-ICP-MS. In: K. Jakes (Editeur), *Archaeological chemistry: materials, methods, and meaning*. ACS Symposium Series 831. American Chemical Society, Washington, p. 48-63.
- Sutherland, C.H.V. et Harold, M., 1961. The Silver Content of Diocletian's Early Post-Reform Copper Coins. *Archaeometry*, 4, p. 56-61.
- Sylvester, P.J., 2003. Trace element analysis of fused whole rock glasses by laser ablation ICPMS. *Laser-Ablation ICPMS in the Earth Sciences. Principles and Applications* (ed. Sylvester, PJ). Mineralogical Association of Canada Short Course Series, 29, p. 147-162.
- Tate, J., 1986. Some problems in analysing museum material by nondestructive surface sensitive techniques. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 14 (1), p. 20-23.
- Teboulbi, A., Bompaire, M. et Barrandon, J.-N., 2008. Les monnayages d'Alphonse de Poitiers. Etude par analyses élémentaires. Comparaison avec le monnayage antérieur de Toulouse. *Revue Numismatique*, 164, p. 65-126.
- Thompson, M., 1960. Gold and copper traces in late Athenian silver. *Archaeometry*, 3 (1), p. 10-15.
- Vanhaecke, F., Resano, M., Garcia-Ruiz, E., Balcaen, L., Koch, K.R. et McIntosh, K., 2004. Laser ablation-inductively coupled plasma-dynamic reaction cell-mass spectrometry (LA-ICP-DRC-MS) for the determination of Pt, Pd and Rh in Pb buttons obtained by fire assay of platiniferous ores. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 19 (5), p. 632-638.
- Vlachou-Mogire, C., Stern, B. et McDonnell, J.G., 2007. The application of LA-ICP-MS in the examination of the thin plating layers found in late Roman coins. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B*, 265, p. 558-568.
- Watling, R.J., Herbert, H.K., Delev, D. et Abell, I.D., 1994. Gold fingerprinting by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Spectrochimica Acta, Part B: Atomic Spectroscopy*, 49 (2), p. 205-219.
- Weber, G., Guillaume, J., Strivay, D., Garnir, H.P., Marchal, A. et Martinot, L., 2000. Is the external beam PIXE method suitable for determining ancient silver artifact fineness? *Nuclear Instruments and Methods in Physics*

Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 161-163,  
p. 724-729.

Yasuhara, H., Okano, T. et Matsumura, Y., 1992. Determination of trace elements  
in steel by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry.  
The Analyst, 117 (3), p. 395-399.



**Deuxième partie :**  
**Application au monnayage carolingien**



Sauf mention contraire, toutes les photographies de monnaies présentées sont à l'échelle 1:1, le droit puis le revers.

## Abréviations

BnF : Cabinet des Médailles de la Bibliothèque nationale de France

Prou : M. Prou, Les monnaies carolingiennes. Catalogue des monnaies de la Bibliothèque Nationale, Paris, 1896.

MG : K.F. Morrison, avec la collaboration de H. Grunthal, Carolingian coinage, Numismatic Notes and Monographs 158, New York, 1967.

Gariel : E. Gariel, Les monnaies royales de France sous la race carolingienne, 1883-4, Strasbourg.

Haertle : C.M. Haertle, Karolingische Munzfunde aus dem 9. Jahrhundert, 1997, Cologne, Weimar et Vienne.

MEC : Ph. Grierson et M. Blackburn, Medieval European Coinage 1. The Early Middle Ages (5<sup>th</sup>-10<sup>th</sup> centuries), 1986, Cambridge.

Les abréviations suivantes sont utilisées sur les graphiques pour désigner les types monétaires ou périodes d'émission :

« Pépin » pour les émissions de Pépin le Bref dans leur ensemble.

« Carlm. » pour les émissions de Carloman dans leur ensemble.

« C1 » pour les monnaies du Type 1 de Charlemagne.

« C2 » pour les monnaies du Type 2 de Charlemagne.

« L Aq » pour les monnaies de Louis roi d'Aquitaine.

« C3 » pour les monnaies du Type 3 de Charlemagne.

« C4 » pour les monnaies du Type 4 de Charlemagne.

« L1 » pour les monnaies du Type 1 de Louis le Pieux.

« L2 » pour les monnaies du Type 2 de Louis le Pieux.

« L2 Venise » pour les monnaies de Venise frappées au Type 2 de Louis le Pieux.

« L3 » pour les monnaies du Type 3 de Louis le Pieux.

« Pép. I<sup>er</sup> Aq » pour les monnaies de Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine.

« Pép. II Aq » pour les monnaies de Pépin II d'Aquitaine.

« Loth. » pour les émissions de Lothaire.

« CC 1 » pour les émissions de Charles le Chauve antérieures à l'édit de Pîtres.

« CC 2 » pour les émissions de Charles le Chauve postérieures à l'édit de Pîtres.

« CC Emp » pour les émissions impériales de Charles le Chauve.

« CC Monog. » pour les émissions au monogramme carolin attribuées à Charles le Chauve.

« Monog. » pour les monnaies au monogramme carolin de période d'attribution incertaine.





## Introduction

L'intérêt de l'application de méthodes de caractérisation physico-chimiques à des problématiques numismatiques n'est plus à démontrer. Des données nouvelles peuvent ressortir de recherches menées selon cette approche, que les seules disciplines traditionnellement liées à l'étude des monnaies n'auraient pu mettre en évidence.

Les analyses de monnaies anciennes ne doivent pas être considérées comme un complément luxueux destiné à produire des tableaux de résultats qui illustreront les publications numismatiques. Il s'agit d'une discipline à part entière susceptible d'apporter de nouveaux éléments de réflexion pour le numismate ou l'historien. Selon Lafaurie, « *l'histoire des monnaies est inscrite autant sur sa surface que dans sa teneur en métal fin.*<sup>5</sup> ». Les programmes de recherche antérieurs l'ont démontré : seule la collaboration entre des analystes sensibilisés aux problématiques numismatiques, historiques et économiques, et des chercheurs de ces dernières disciplines ouverts à cette approche originale, peut permettre de produire des résultats pertinents et des connaissances nouvelles qui alimenteront les réflexions historiques.

Deux aspects principaux des résultats analytiques obtenus, sous réserve que la méthode employée permette une caractérisation complète des alliages monétaires, sont étudiés lors de l'interprétation historique des résultats : la pureté de l'alliage d'une part, et les teneurs d'impuretés caractéristiques d'autre part. Certains impératifs analytiques, numismatiques et historiques doivent toutefois être pris en compte lors de l'élaboration de programmes de recherche basés sur la caractérisation élémentaire de monnaies anciennes, pour que l'interprétation des résultats soit fructueuse.

En numismatique carolingienne, ce ne sont bien souvent que quelques résultats d'analyses de monnaies clairsemés qui ont illustré les publications. Les numismates ou analystes ne sont pas à mettre en cause directement : les moyens financiers nécessaires à la mise en pratique de tels programmes de recherche, ainsi que la faible accessibilité des moyens analytiques les plus performants, sont des facteurs limitants pour de telles recherches. Il est toutefois indéniable que les monnaies des premiers carolingiens n'avaient, jusqu'à l'heure actuelle, pas fait

---

<sup>5</sup> (Lafaurie, 1970) p. 124.

l'objet d'une campagne d'analyses ambitieuse à la hauteur des problématiques sous-jacentes.

Dans les recherches incluant la caractérisation de métaux monnayés, la meilleure représentativité du *corpus* des échantillons permet la plus grande confiance dans les résultats. Ce sont donc des groupes de monnaies conséquents qu'il convient d'étudier du point de vue de leur composition pour que les résultats apportent un nouvel éclairage fiable aux données « traditionnelles ». Cette nécessité de représentativité des *corpus* a été mise en avant par Dumas ainsi : « *Pas plus que son poids, la composition d'une seule pièce ne peut être tenue, a priori, pour une donnée précise et fiable. Comme pour les pesées, des analyses systématiques devraient être pratiquées afin de déterminer les titres des diverses émissions.*<sup>6</sup> ». Les seules limitations inhérentes aux études métrologiques qui portent sur la masse des monnaies sont l'existence même et l'accessibilité à un nombre représentatif d'exemplaires de chaque type ou variété. La mise en œuvre de la mesure est en revanche des plus simples et des plus rapides ; la pesée peut, de plus, être effectuée dans le lieu même de conservation des objets. Cela n'est pas possible pour déterminer la composition élémentaire des monnaies : celles-ci doivent être transportées depuis leur lieu de conservation jusqu'au laboratoire d'analyse. La mise en œuvre des analyses est sans commune mesure avec celle de la pesée des exemplaires étudiés. L'appareillage nécessaire, dans la plupart des cas, est coûteux et peu accessible ; le ou les analystes doivent être formés spécifiquement à l'analyse de monnaies anciennes : l'expérience a montré que les caractérisations commandées par des numismates ou conservateurs à des scientifiques dont la spécialité n'est pas la connaissance des alliages monétaires, ni même celle des matériaux anciens, fournit le plus souvent des résultats inexploitable. L'élaboration d'un programme d'analyses de monnaies anciennes doit tenir compte de l'accessibilité des moyens analytiques et de celle d'un nombre d'exemplaires conséquent.

Une collection nationale majeure comme celle du Cabinet des Médailles de la Bibliothèque nationale de France constitue un support de choix pour un programme de recherche d'envergure portant sur l'analyse élémentaire de monnaies carolingiennes. Malgré la faible représentativité du nombre d'exemplaires pour les types monétaires les plus rares, ou une variété parfois restreinte pour les études régionales ou locales, cette collection de monnaies carolingiennes offre d'excellentes bases pour nombre de problématiques. Notre *corpus*, constitué essentiellement des pièces de la collection nationale française,

---

<sup>6</sup> (Dumas-Dubourg, 1971) p. 41 n. 1.

offre une représentativité au moins satisfaisante pour la plupart des types monétaires principaux de la période étudiée.

L'importance du *corpus* monétaire permet la représentativité des analyses ; aussi importante soit-elle, cette représentativité n'est rien si la méthode d'analyse mise en œuvre est biaisée ou aléatoire. De ce point de vue, il a été démontré dans la première partie de cette thèse que la méthode LA-ICP-MS constitue à l'heure actuelle l'outil le plus fiable et le plus adapté pour déterminer la composition des monnaies d'argent. La prise en compte de l'enrichissement de surface grâce à l'approche en profils de concentration est primordiale pour le dosage des éléments majeurs ; les limites de détection très faibles et la précision des mesures pour la plupart des éléments mineurs et traces permettent de plus une caractérisation de l'ensemble des constituants des alliages monétaires. En pratique, la précision des mesures du titre d'argent des monnaies permet d'observer des tendances relativement peu marquées qui seraient passées inaperçues si d'autres moyens analytiques avaient été mis en œuvre ; celle du dosage des éléments mineurs et traces permet d'aborder les études de provenance des métaux alliés sur les meilleures bases également.

Les analyses élémentaires de monnaies anciennes, pour peu que la méthode employée permette la caractérisation de l'ensemble des constituants des alliages, peuvent servir de support pour deux approches d'interprétation : l'étude de la pureté ou titre d'une part, et les teneurs des éléments mineurs et traces d'autre part.

Le titre des monnaies correspond à leur teneur en métal noble. C'est cette mesure qui leur confère leur valeur intrinsèque. Selon les époques et les visées des souverains, le titre des émissions peut avoir évolué au cours du temps alors que la valeur d'échange est supposée invariante. La mise en évidence de tels phénomènes peut par exemple informer sur le contrôle exercé par le souverain sur les ateliers monétaires. Des éléments d'ordre historique ou numismatique peuvent laisser présager de la mainmise royale sur les ateliers de fabrication monétaire ; de telles suppositions n'ont toutefois pas valeur de démonstration, et sont insuffisantes lorsqu'il s'agit d'étudier des évolutions peu marquées ou des particularités régionales ou locales. Les réflexions doivent reposer sur des données sûres que seule l'analyse élémentaire peut fournir.

L'étude du titre des monnaies carolingiennes analysées a porté sur différents aspects. Le principal concerne l'évolution de cette caractéristique au cours du temps. Les monnaies carolingiennes sont datées d'après leurs types de droit et de revers, c'est-à-dire d'après les légendes et motifs qui apparaissent sur les deux faces des pièces. Ces données sont caractéristiques d'années d'émission et

permettent de situer la date de fabrication des pièces. Les connaissances numismatiques offrent donc de raisonner sur des périodes auxquelles correspondent des types de droit et de revers précis. La durée de ces périodes d'émission peut varier selon les types monétaires carolingiens étudiés de deux ans environ à plus de vingt ans. Seules les évolutions correspondant à un changement de typologie peuvent être étudiées : il ne sera par exemple pas possible de suivre d'éventuels changements dans la pureté d'argent des monnaies du Type 3 de Charlemagne dont la période d'émission s'étend de 793/4 à 812. Chaque groupe typologique constitue une entité qui correspond à une période historique. Les conséquences des réformes, dont la principale, pour notre période, est celle initiée par Charlemagne durant l'hiver 793/4, ont été étudiées du point de vue de l'évolution du titre d'argent. Les transitions monétaires correspondant au passage d'un souverain à un autre ont également fait l'objet d'une attention particulière. Enfin, pour l'ensemble de la période, le titre d'argent moyen ainsi que la dispersion des valeurs individuelles ont été mis en relation avec le contexte historique et les données qui ressortent de l'étude des trouvailles monétaires.

La mention du lieu d'émission qui apparaît sur la plupart des monnaies carolingiennes analysées permet d'étudier de possibles disparités régionales ou locales du point de vue de la pureté des alliages qui les constituent. Le royaume franc et l'empire carolingien, en dépit de leur unité politique, sont constitués de territoires divers, qui pour certains d'entre eux n'ont été incorporés que quelques années avant que les premières pièces carolingiennes n'y soient émises. D'éventuelles spécificités dans la pureté d'argent des pièces originaires de ces régions ont donc été étudiées.

La connaissance du titre d'argent présente un intérêt pour la datation de certaines monnaies. Malgré les progrès de la numismatique carolingienne, quelques groupes de pièces ne peuvent à l'heure actuelle être datés d'une période d'émission précise avec certitude. Certaines hypothèses formulées par des numismates quant à l'attribution de monnaies à un souverain ou à une période ont donc été étudiées grâce à l'information nouvelle de leur pureté d'argent. L'étude des pièces au monogramme carolin de certains ateliers d'Aquitaine, pour lesquelles la numismatique est insuffisante pour distinguer les exemplaires de Charlemagne de ceux de Charles le Chauve, constitue la principale problématique de ce point de vue. Certaines réattributions ont également pu être envisagées grâce à la connaissance de la composition chimique des monnaies.

La mise en parallèle de la pureté des pièces carolingiennes avec les textes de loi de cette époque spécifiques à la fabrication monétaire ne présente que peu d'intérêt : ces textes précisent que la monnaie officielle doit être constituée d'argent

pur, et que celles qui ne présentent pas cette caractéristique doivent être considérées comme fausses. Nous verrons que ce n'est à aucun moment le cas pour la période considérée et que, même pour les types monétaires pour lesquels le titre d'argent est très élevé et le contrôle strict du souverain sur la fabrication monétaire indiscutable, les alliages constituant les pièces carolingiennes contiennent quelques pourcents de cuivre au moins. L'analyse élémentaire permet toutefois d'identifier les fausses monnaies – du moins certaines d'entre elles, des faux modernes peuvent présenter un bon titre d'argent – et donc de les exclure des réflexions numismatiques et historiques.

Le dosage des éléments mineurs et traces dans les alliages monétaires permet d'évaluer la quantité d'impuretés qu'ils contiennent. Ces éléments sont présents le plus souvent à de très faibles teneurs, et n'ont pas été affectés par les opérations métallurgiques depuis le minerai jusqu'à la monnaie pour la plupart d'entre eux. Il peut donc s'agir, pour certains d'entre eux, de « traceurs » susceptibles de différencier des stocks de métaux précieux différents, sous réserve que ces signatures chimiques n'aient pas été affectées par des mélanges ou des pollutions extérieures. Les teneurs de l'ensemble des éléments mineurs et traces dosés lors de l'analyse par LA-ICP-MS ont donc été étudiées individuellement pour tenter de mettre en évidence la présence éventuelle de tels traceurs dans certaines des monnaies carolingiennes caractérisées.

Dans les cas les plus favorables, la corrélation entre les signatures chimiques des monnaies d'après leurs teneurs en éléments-traces, l'étude numismatique et le contexte historique, peut permettre de formuler des hypothèses quant à l'origine d'un stock de métal précieux. Le précédent fameux du traçage de l'incorporation de l'or provenant du Brésil dans la circulation européenne du XVIII<sup>e</sup> siècle grâce au dosage du palladium<sup>7</sup> est présent à l'esprit de l'analyste qui s'attèle à une problématique de provenance des métaux monnayés. C'est la réussite de telles études qui encourage à l'entreprise de nouvelles recherches dans ce domaine. La problématique doit toutefois être consciencieusement définie : certaines conditions doivent en effet être réunies pour qu'il soit seulement envisageable de mettre en évidence de mouvements ou mélanges de stocks de métaux précieux d'origines différentes. Quand bien même de tels échanges auraient-ils eu lieu, rien ne garantit qu'un traceur chimique détectable par nos moyens analytiques en ait été le témoin. Tandis que l'étude du titre d'argent d'un nombre représentatifs d'échantillons permet au moins de suivre l'évolution de la pureté des alliages durant la période étudiée, les études de provenance impliquant

---

<sup>7</sup> Voir (Morrisson *et al.*, 1999).

des différences de teneurs en éléments-traces présentent un caractère aléatoire quant à leur réussite. Il convient donc d'étudier avec soin les données historiques et numismatiques afin d'identifier les facteurs favorables aux études de ce type. Les questions de provenance de l'argent carolingien liées à la présence potentielle d'éléments traceurs dans les monnaies ont largement contribué à la définition de la problématique historique développée dans cette thèse.

De nombreuses incertitudes entourent le monnayage des premiers carolingiens. La principale concerne l'origine de l'argent utilisé pour la fabrication monétaire, alors que le monométallisme argent est établi depuis le dernier quart du VII<sup>e</sup> siècle environ. Mais plus encore que la fin de la période mérovingienne qui marque l'introduction de la frappe exclusive de l'argent, le début de la période carolingienne présente des caractéristiques qui justifient que l'attention lui soit portée préférentiellement quant à l'origine de l'argent monnayé durant le haut Moyen Age en Occident. Cette question centrale a été reprise par de nombreux chercheurs. Metcalf par exemple la formule ainsi : « *Where did all this silver suddenly come from ? Could it have reached northern Italy and Gaul from the Islamic world by way of Mediterranean trade? Could silver had trickled westwards through the Baltic coasts and islands, where such enormous quantities of dirhams have been found, from the hands of the Norsemen into those of the Franks, in the ninth century?*<sup>8</sup> ». Hodges et Whitehouse introduisirent quant à eux la question comme suit : « *Mais d'où venaient les masses considérables d'argent neuf nécessaires à ces frappes ? Grierson émet l'hypothèse qu'une partie de ce métal a pu être extraite de mines nouvelles et attire l'attention sur la légende Ex me(t)allo novo qui figure sur quelques-uns de ces deniers. Mais il n'y a pas de témoignage décisif à ce sujet ; au contraire, le peu de pièces conservées avec cette légende paraîtrait plutôt en faveur de l'idée exprimée autrefois par Sture Bolin selon qui cette réforme (y compris certaines des légendes monétaires) avait été influencée par le monnayage abbasside contemporain. Des dirhems de cette époque portent en effet une légende similaire en arabe. N'est-ce pas une raison pour chercher ailleurs l'origine de ces nouvelles masses d'argent obtenues par la cour carolingienne, qui s'en servit ensuite à son avantage ?*<sup>9</sup> ». C'est sur les échanges à longue distance que ces auteurs attirent l'attention pour la recherche d'une source possible d'argent pour la frappe monétaire carolingienne. Les liens avec le monde arabe, par la Méditerranée ou à travers la Russie puis la mer Baltique, sont mis en évidence et semblent constituer des pistes à étudier pour comprendre la question de l'origine de l'argent carolingien.

---

<sup>8</sup> (Metcalf, 1972) p. 406.

<sup>9</sup> (Hodges et Whitehouse, 1996) p. 111.

Dans l'état actuel des connaissances, il semble en effet que le seul gisement d'argent d'importance identifié pour le territoire carolingien, celui de Melle, ait eu surtout une influence régionale. C'est du moins ce qui ressort des recherches menées sur le lien entre les rapports isotopiques du plomb du minerai provenant de cette mine et ceux de monnaies carolingiennes émises par divers ateliers de l'ouest de la France<sup>10</sup>. Si Melle n'a pas approvisionné en argent des ateliers relativement proches (Poitiers, Bordeaux), il est difficile d'imaginer que cette mine ait pu subvenir aux besoins d'ateliers plus éloignés, jusqu'en Italie pour la période d'extension maximale d'un territoire carolingien unifié. Alors, quelles autres sources de métal envisager ? L'exploitation intensive des importants gisements argentifères de l'Europe Centrale n'a pas été démontrée avant le XI<sup>e</sup> siècle. Une hypothèse à considérer pourrait être celle d'un apport d'argent extérieur, par exemple par les échanges à longue distance, notamment avec l'Orient, comme l'ont proposé par exemple les auteurs cités dans le paragraphe précédent. Deux principales voies d'accès de ce métal précieux oriental – qui ne sont pas incompatibles – sont à prendre en considération : l'apport d'argent arabe ou éventuellement byzantin par le commerce à longue distance à travers la Méditerranée<sup>11</sup> ; et l'arrivée de l'argent oriental dans les *emporía* du nord, apport qui semble commencer vers 800 et qui se développe au cours du IX<sup>e</sup> siècle.

Dans cette optique, les monnaies portant les noms de principaux ports qui servirent d'interfaces entre l'empire carolingien et d'autres civilisations ont fait l'objet d'une attention particulière du point de vue de leurs teneurs en éléments mineurs et traces. Ce sont les exemplaires de Venise d'une part, et ceux des comptoirs commerciaux du nord Dorestad et Quentovic d'autre part, qui constituent les principaux sujets d'étude pour ces problématiques. Ce sont en effet les lieux d'émission de ces centres d'échanges qui pourraient les premiers avoir intégré de l'argent « étranger » à la masse de métal utilisée pour la fabrication monétaire.

Le rôle de Melle a toutefois été étudié de manière approfondie : le statut particulier de cet atelier lié à un site de production d'argent de grande importance, ainsi que la grande proportion des monnaies de ce nom au sein de notre *corpus*, justifient qu'une attention particulière leur soit accordée. Peut-être l'argent mellois présente-t-il une signature en éléments-traces caractéristique qui pourrait permettre de l'identifier dans certaines monnaies carolingiennes.

---

<sup>10</sup> (Barrandon et Dumas, 1990).

<sup>11</sup> (McCormick, 2001) p. 319-387.

Près de cinq cents monnaies carolingiennes au total ont été analysées dans le cadre de cette thèse. Leur émission s'étend de 751 avec les premières frappes au nom d'un souverain carolingien, jusqu'au-delà de 864, date d'une réforme monétaire de première importance. Les exemplaires étudiés portent les noms de huit souverains différents qui représentent quatre générations. Les problématiques liées aux analyses de ces pièces sont nombreuses et variées. L'approche proposée s'est avérée limitée pour certaines d'entre elles ; l'analyse élémentaire a en revanche livré des informations essentielles pour d'autres, dont les implications s'intègrent dans des réflexions qui dépassent le seul cadre de la frappe monétaire dans l'Occident carolingien.

## **A. Le contexte historique**

Les Carolingiens succèdent aux Mérovingiens durant le VIII<sup>e</sup> siècle<sup>12</sup>. Charles Martel est Maire du Palais d'Austrasie de 737 à 741, mais ne portera jamais le titre de souverain du royaume franc. Le fléchissement croissant du pouvoir des rois mérovingiens depuis la seconde moitié du VII<sup>e</sup> siècle lui profite et c'est Charles qui est le véritable dirigeant du royaume. A sa mort, la charge de Maire du Palais est partagée entre ses deux fils Pépin et Carloman. Ce dernier choisit la vie monastique en 747, et Pépin dit le Bref devient le seul dirigeant effectif de l'ensemble du royaume franc. Son territoire couvre alors la majeure partie de la Belgique et de la France actuelles.

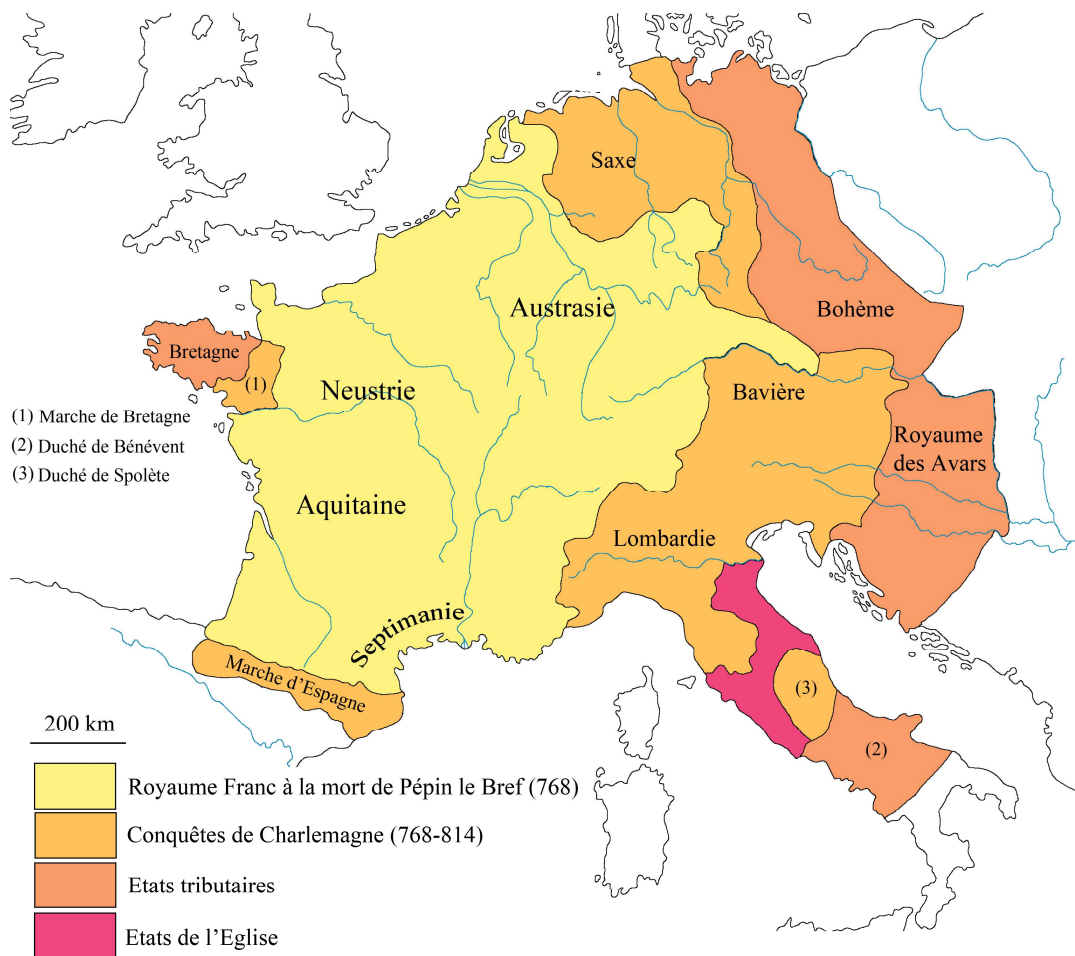
Avec l'assentiment du pape, Pépin le Bref dépose le dernier roi mérovingien Childéric III en novembre 751 et se fait élire roi des Francs. Il soutient le pape dans sa lutte contre les Lombards en Italie. Il repousse les Arabes en Septimanie et prend le contrôle de l'Aquitaine.

Conformément à la tradition franque héritée des Mérovingiens, le territoire de Pépin le Bref est partagé entre ses deux héritiers Carloman et Charles à sa mort en 768. Carloman meurt rapidement et, en 771, Charles – le futur Charlemagne – est le seul souverain du royaume franc. Son règne est marqué par une activité militaire intense qui a pour conséquence un élargissement des frontières : à l'orée du IX<sup>e</sup> siècle, le territoire franc s'étend de l'océan Atlantique à l'Adriatique et de l'Ebre jusqu'à la Weser (Figure 68). Charlemagne est couronné empereur le jour de Noël de l'an 800. Son règne voit une reprise économique sensible ainsi qu'un renouveau dans les arts.

---

<sup>12</sup> D'après (Riché, 1983). Un arbre généalogique simplifié des premiers souverains carolingiens apparaît sur la Figure 70 p. 201.

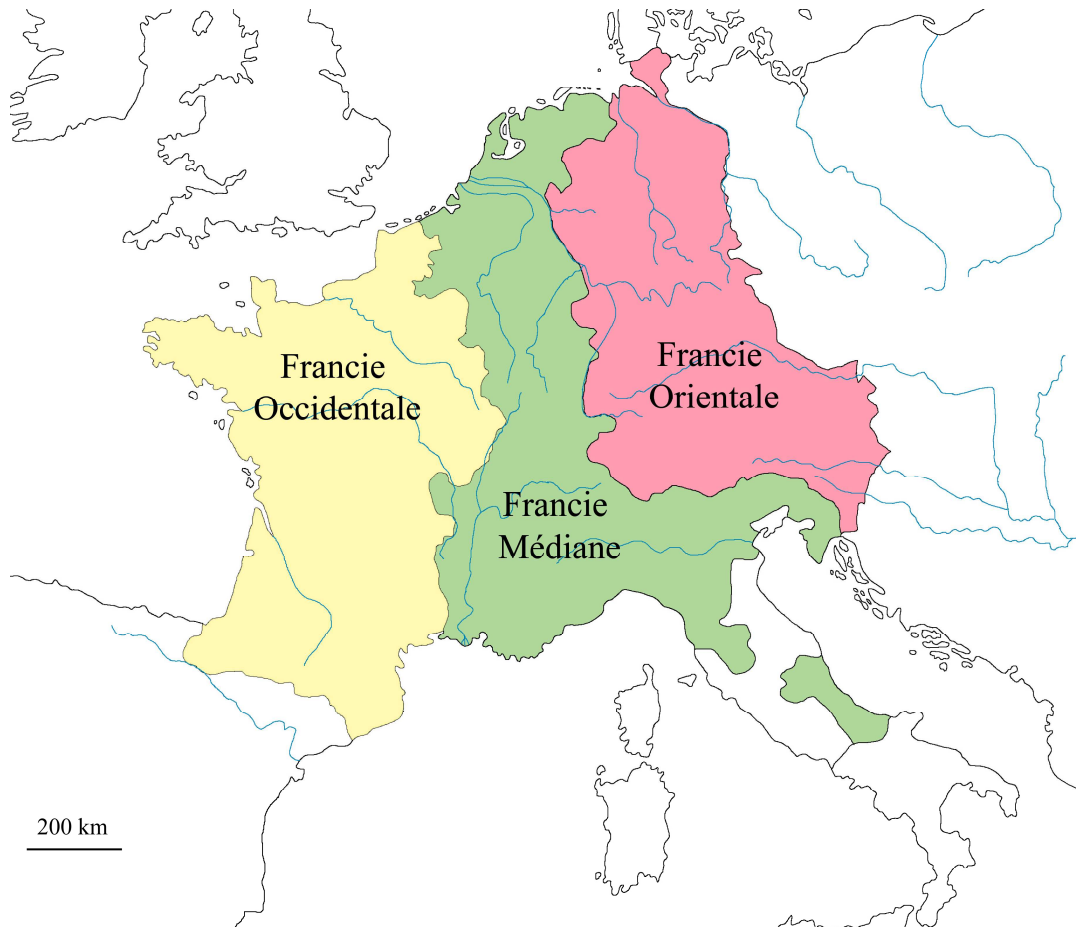




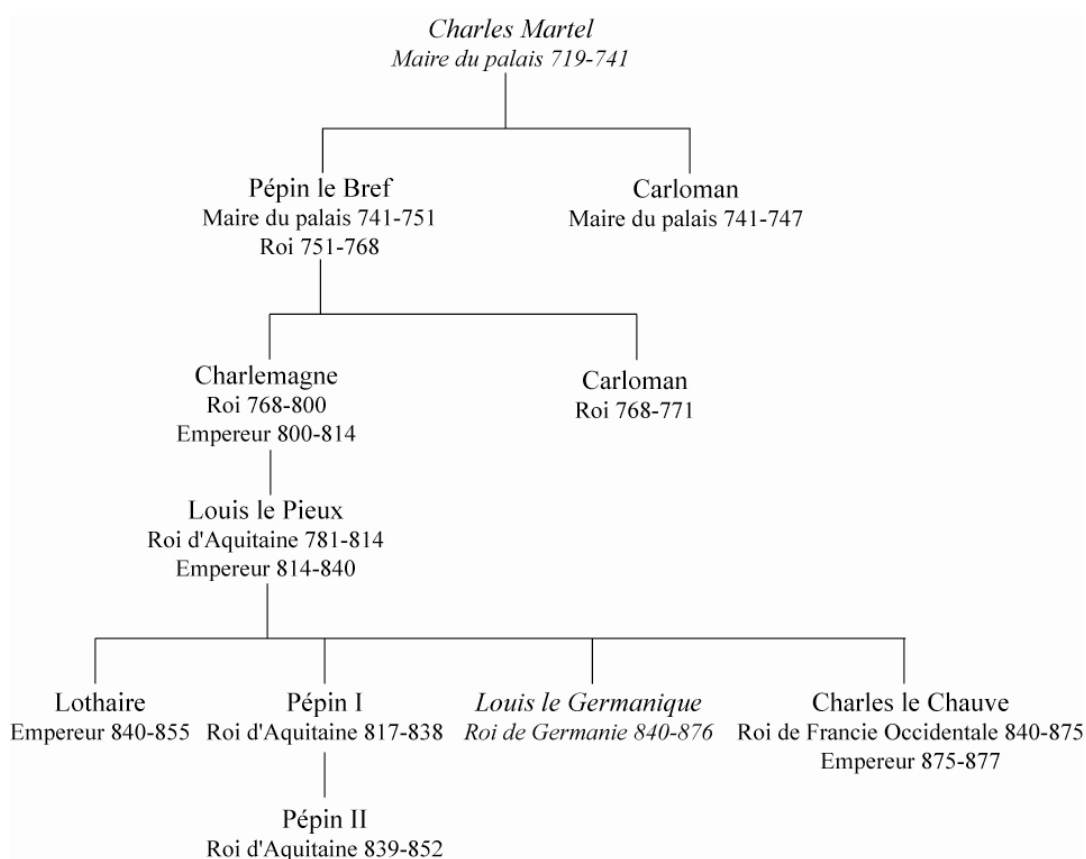
**Figure 68** - Carte de l'Occident carolingien à l'époque de Charlemagne.

Charlemagne meurt au début de l'année 814. Seul son fils Louis lui a survécu. Le territoire carolingien évite donc le partage entre les différents héritiers. Louis, d'abord roi d'Aquitaine depuis 781, est associé à l'empire depuis 813. Dès 817, le nouvel empereur prévoit sa succession et attribue des territoires à chacun de ses trois fils Lothaire, Louis et Pépin. Mais la naissance d'un quatrième héritier en 823 de son union avec sa nouvelle épouse Judith modifie ses prévisions. Louis le Pieux change sa succession pour y intégrer Charles en 829. Les trois aînés se révoltent contre leur père sous l'impulsion de Lothaire. Les années 830 sont marquées par des troubles à l'intérieur de l'empire ; en 833, Louis est déposé de son titre impérial. Il le retrouve en 835.

A la mort de Louis le Pieux en 840, les hostilités reprennent entre ses fils. Lothaire se proclame seul empereur et combat ses deux frères Charles le Chauve et Louis le Germanique. Les trois héritiers trouvent un compromis et signent le traité de Verdun en 843. Charles le Chauve reçoit la Francie Occidentale, Lothaire la Francie Médiante qui deviendra la Lotharingie, et Louis le Germanique la Francie Orientale (Figure 69).



**Figure 69** - Carte du partage de Verdun de 843 entre les trois héritiers de Louis le Pieux.



**Figure 70** - Généalogie simplifiée des premiers souverains carolingiens. D'après MEC p. 193.

## B. La numismatique des premiers carolingiens

### I. Généralités

La monnaie est définie par Lafaurie comme « *tout flan de métal, de poids et de composition déterminés portant des empreintes qui indiquent son origine, le responsable ou le garant de sa fabrication par des légendes ou des figurations imagées.*<sup>13</sup> ». Les légendes et figurations qui apparaissent sur le droit et le revers des monnaies en constituent le type. Pour les émissions carolingiennes, ce sont ces caractéristiques qui permettent de rapprocher une pièce d'une période d'émission, et donc de situer chronologiquement sa frappe.

<sup>13</sup> (Lafaurie, 1970) p. 118. Il s'agit ici d'une définition qui concerne exclusivement la monnaie métallique. Lafaurie renvoie à la définition de Gonnard (« *la meilleure définition de la monnaie, dans son sens le plus général* »), qui intègre l'ensemble des moyens de transaction : « [est une monnaie] *toute chose qui, par la convention tacite ou expresse des hommes, se trouve investie de la double fonction d'intermédiaire des échanges et d'intermédiaire des évaluations ou de cette seconde fonction seulement.* ». Voir (Gonnard, 1935-6) p. 9-10.

La principale particularité des émissions monétaires de la période carolingienne est le monométallisme argent. Celui-ci apparaît à la fin de la période mérovingienne vraisemblablement autour de 675 sous forme de deniers, et remplace un monnayage d'or altéré. Le monométallisme argent perdure durant six siècles en France et dans la plus grande partie de l'Europe<sup>14</sup>. Quelques monnaies d'or ont été frappées aux noms de Charlemagne et Louis le Pieux mais ces pièces sont pour l'essentiel le produit d'émissions de prestige. On considère donc qu'elles ne participent pas véritablement à l'économie.

La base du système monétaire carolingien est le denier. Cette espèce est très largement majoritaire, bien que des demi-deniers ou oboles aient été frappés durant certaines périodes afin de faciliter les transactions de faible valeur. Le sou et la livre sont des unités de poids et de compte. Un sou vaut douze deniers, et deux cent quarante deniers sont taillés dans une livre. Ce système de compte perdure jusqu'à la Révolution.

La livre médiévale est héritée de la livre romaine de 327 g. Pépin le Bref augmente une première fois l'étalon de masse utilisé pour la taille<sup>15</sup> des deniers en juillet 755 dans le capitulaire de Ver. L'hiver 793/4 est l'occasion pour Charlemagne d'appliquer à la monnaie une réforme qui s'inscrit dans celle, plus générale, des poids et mesures, initiée en 789<sup>16</sup> : la masse de la livre, et donc celle du denier, augmentent de manière significative.

Des différentes approches employées afin de déterminer la masse de la « livre de Charlemagne », l'étude statistique d'un grand nombre de deniers semble être la plus pertinente<sup>17</sup>. La livre de Charlemagne aurait ainsi pesé 409 g environ<sup>18</sup>. La masse des deniers serait donc passée de près de 1,3 g avant la réforme à 1,7 g après. Certains numismates avancent que la masse des monnaies carolingiennes aurait à nouveau augmenté lors du passage du Type 1 au Type 2 de Louis le Pieux en 818<sup>19</sup>. Les deniers auraient ainsi pesé 1,8 g pendant les quelques années d'émission des monnaies de ce type, avant de retrouver le standard de la livre de

---

<sup>14</sup> (Bompaire et Dumas, 2000).

<sup>15</sup> Le terme de taille désigne le « nombre de pièces de monnaie à produire ou produites sans une certaine quantité de métal ou d'alliage [...] fixé au préalable par l'autorité émettrice » d'après (Amandry et al., 2001).

<sup>16</sup> (Lafaurie, 1977) p. 487.

<sup>17</sup> « Il n'est donc pas possible [...] de déduire le poids légal d'une émission de monnaies en recherchant le denier le plus lourd mais en calculant le poids moyen d'un nombre important de pièces ». (Lafaurie, 1970) p. 124.

<sup>18</sup> Voir (Suchodolski, 1980), (Morrison et Grunthal, 1967) p. 40-46 et (Morrison, 1963).

<sup>19</sup> (Suchodolski, 1980) et (Coupland, 1990) p. 29.

Charlemagne. Par la suite, un fléchissement de la masse des deniers est observé : il s'amorcerait pour le Type 3 de Louis le Pieux (822/3-840), et se serait poursuivi sous Lothaire (840-855) et sous Charles le Chauve (840-864). La masse des deniers pourrait avoir décliné jusqu'à 1,5 g environ. L'étude métrologique de Morrison montre enfin un retour au standard de masse mis en place par Charlemagne suite à la réforme monétaire de l'édit de Pîtres, à partir de 864<sup>20</sup>.

Les textes de loi carolingiens sur la monnaie<sup>21</sup> traitent pour la plupart d'entre eux de l'introduction d'un nouveau type monétaire et du décri du précédent. Les changements de type sont considérés comme des tentatives pour éliminer les fausses monnaies de la circulation. Cette préoccupation récurrente des souverains carolingiens qui transparaît des lois sur la monnaie laisse entendre qu'une proportion non négligeable des pièces en circulation était considérée comme fausse. Les caractéristiques du « bon denier » d'après les capitulaires sont une bonne masse et une composition d'argent pur. Selon Lafaurie, le faux denier serait, par opposition, « celui qui est allié d'un autre métal que l'argent et qui ne pèse pas le bon poids.<sup>22</sup> ».

La question de la masse semble simple à élucider : les pièces trop légères doivent être selon les textes considérées comme fausses. La taille des deniers dans la livre *al marco* et non *al pezzo* constitue cependant une limitation à cette approche : si ce sont bien deux cent quarante deniers qui sont produits pour chaque livre d'argent, la masse de chaque pièce peut varier par rapport au 1/240<sup>e</sup> de celle de la livre<sup>23</sup>. Des monnaies plus légères que le standard de masse, et d'autres plus lourdes, ont ainsi été produites dans les ateliers de frappe carolingiens sans que l'on puisse les considérer comme des faux. La tolérance quant à la masse des deniers au sein des ateliers officiels n'est pas connue, et elle est difficile à évaluer. Il paraît, de plus, difficile d'imaginer que des faux-monnayeurs aient frappé des monnaies de masse nettement plus faible que les émissions officielles afin de les incorporer à la circulation monétaire. C'est donc davantage sur le titre des alliages que les faussaires auraient tiré bénéfice de leur entreprise.

Bompaire et Dumas distinguent les « *contrefaçons* », « *imitations* » et les « *faux modernes* » parmi les pièces qui ne sont pas authentiques<sup>24</sup>. Les

---

<sup>20</sup> (Morrison et Grunthal, 1967) p. 421.

<sup>21</sup> Voir (Lafaurie, 1977) pour une approche générale de l'ensemble de ces textes.

<sup>22</sup> (Lafaurie, 1977) p. 494.

<sup>23</sup> (Lafaurie, 1970) p. 124.

<sup>24</sup> (Bompaire et Dumas, 2000), p. 109. Les pièces des types décriés sont considérées de la même manière que les faux bien que leur émission ait été le fait d'ateliers officiels, et qu'elles aient correspondu aux critères définis pour les bonnes monnaies. Du point de vue du numismate moderne, l'idée de monnaie décriée n'a évidemment pas de sens pour identifier les fausses pièces.

contrefaçons sont définies comme des pièces similaires à celles ayant cours, fabriquées par des faux-monnayeurs et d'une valeur intrinsèque plus faible. Leur but étant d'être intégrées à la circulation monétaire, les contrefaçons peuvent être retrouvées dans les trésors comme dans les collections. Il s'agit donc de témoignages historiques, bien que ces pièces ne soient pas officielles – elles peuvent toutefois être issues des ateliers royaux ou impériaux, et l'on parlera, dans ces cas, de fraudes d'ateliers. Selon Bompaire et Dumas, les imitations sont des monnaies qui reproduisent les principales caractéristiques d'un type monétaire en circulation, mais sur lesquelles apparaît la marque de l'autorité émettrice véritable. Le but de la frappe de ces monnaies n'est donc pas de tromper la population en introduisant des pièces non officielles dans la circulation. Enfin, les faux modernes sont des reproductions de monnaies qui n'ont plus cours, fabriquées dans le but de tromper les collectionneurs et de tirer profit de leur vente.

L'expérience acquise dans le cadre de cette thèse a montré que si des suspicions de titre faible peuvent être émises à partir de l'aspect de certaines pièces ou d'incohérences numismatiques, certains deniers relativement impurs, ou même dans lesquels l'argent est absent, sont en tous points similaires aux exemplaires authentiques. La contradiction entre les textes de loi carolingiens décrivant la fausse monnaie et leur identification d'après l'un des deux critères mis en avant a été résumée ainsi par Lafaurie : « *Unless the forger was incompetent and his coins obviously bad, it must have been very difficult for members of the general public to distinguish bad coin from good.*<sup>25</sup> ». A moins d'effectuer une opération métallurgique sur l'alliage monétaire comme une coupellation, afin de comparer la masse du denier avec celle du métal noble qui en aura été extrait, il semble très difficile de distinguer un bon denier d'un faux, sous réserve que le faux-monnayeur ait travaillé « consciencieusement ». La difficulté de la mise en œuvre de l'identification des monnaies considérées comme fausses a sans doute contribué aux changements réguliers des types de droit et de revers que l'on observe durant la période carolingienne. Le remplacement des pièces en circulation par des nouvelles facilement identifiables peut ainsi avoir permis de restaurer la confiance de la population dans la monnaie comme le fait remarquer Suchodolski<sup>26</sup>. Ce critère est d'autant plus important que l'économie carolingienne n'est que partiellement monétarisée<sup>27</sup>.

---

<sup>25</sup> (Lafaurie, 1983) p. 139.

<sup>26</sup> « *The circulation of large numbers of forged deniers, which the public was not always able to distinguish from the good ones, might have eroded the confidence in all coins.* » (Suchodolski, 1983) p. 148.

<sup>27</sup> L'usage de la monnaie semble cependant relativement courant. Voir (Bruand, 2002) p. 160-161. « *Qui détient de la monnaie ? Presque tout le monde.* ». (Bruand, 2002) p. 165.

Les capitulaires carolingiens relatifs à la frappe monétaire rapportent en outre les tentatives de réduction du nombre d'ateliers. C'est le cas des capitulaires de Thionville en 805, de Nimègue en 808, de l'édit de Pîtres en 864, et probablement auparavant lors de la réforme de 793/4 de Charlemagne<sup>28</sup>. La réduction du nombre de lieux d'émission peut être vue comme un renforcement de l'autorité sur la frappe monétaire. Par opposition, on pourrait déduire de l'augmentation du nombre des officines un relâchement de ce contrôle. La multiplication du nombre des ateliers peut toutefois être interprétée comme une volonté du pouvoir de faciliter la diffusion de la monnaie dans certains territoires où l'absence de centre d'émission causait auparavant une pénurie de numéraire<sup>29</sup>.

## II. Les ouvrages de référence

Deux des premiers ouvrages de référence sur les monnaies carolingiennes sont ceux de Gariel et de Prou<sup>30</sup>. Il s'agit dans les deux cas de descriptions de collections. Gariel décrit celle de son auteur – qui fut par la suite vendue et qui constitue l'essentiel des exemplaires des Staatliche Museen zu Berlin pour cette période – et recense les trouvailles monétaires connues alors ; Prou est le catalogue des monnaies carolingiennes de la BnF. La collection actuelle de cette institution est composée essentiellement des monnaies qui figurent dans Prou, bien que des acquisitions ultérieures à la rédaction de cet ouvrage soient venues l'enrichir et combler certaines lacunes. Prou, et plus encore Gariel, sont maintenant obsolètes : des attributions de période ou d'atelier sont en effet incorrectes à la lumière des connaissances numismatiques actuelles. Grierson attribue certaines inexactitudes de Gariel à la maladie de son auteur durant les dernières années de sa vie qui furent celles de la rédaction de son catalogue<sup>31</sup>, et rappelle que Prou, malgré son implication, n'était pas « numismate de cœur »<sup>32</sup>.

Les premiers volumes du « Traité de numismatique du moyen âge » d'Engel et Serrure<sup>33</sup> et du « Manuel de numismatique française » de Blanchet et Dieudonné<sup>34</sup> sont globalement plus fiables que Gariel et Prou. Ces deux ouvrages

---

<sup>28</sup> (Lafaurie, 1977) p. 495.

<sup>29</sup> (Rovelli, sous presse) p. 15. Bruand interprète une démarche de ce type comme « une décentralisation des pouvoirs qui permet aux autorités locales de participer aux bénéfices de la frappe. ». Voir (Bruand, 2002) p. 170.

<sup>30</sup> (Gariel, 1883-4 ; Prou, 1896). Dans la suite du texte, ces ouvrages sont référencés simplement « Gariel », « Gariel I » ou « Gariel II » pour désigner l'ensemble ou l'un ou l'autre des tomes de cet ouvrage, et « Prou » pour le catalogue de la collection des monnaies carolingiennes du Cabinet des Médailles de la Bibliothèque nationale de France.

<sup>31</sup> (Grierson, 1967) p. 502 n. 6.

<sup>32</sup> (Grierson, 1967) p. 503 n. 8.

<sup>33</sup> (Engel et Serrure, 1891-1905).

<sup>34</sup> (Blanchet et Dieudonné, 1912-1936).

sont toutefois relativement anciens, et n'ont donc pu bénéficier des avancées de la numismatique carolingienne permises par les trouvailles monétaires ultérieures et les recherches associées.

L'ouvrage général sur le monnayage carolingien de Morrison et Grunthal (MG) est relativement récent par rapport à ceux présentés plus haut<sup>35</sup>. Il ne peut toutefois être utilisé comme base de travail fiable pour l'étude des monnaies carolingiennes : nombre d'attributions sont en effet erronées. Il constitue cependant une base de données de types et de masses très importante et présente des planches nombreuses.

Frère a consacré un ouvrage à la numismatique carolingienne en Belgique<sup>36</sup>. Les informations qui y apparaissent sont principalement reprises des publications antérieures.

La dernière tentative d'apporter une vision d'ensemble sur le monnayage carolingien est l'œuvre de Depeyrot<sup>37</sup>. La deuxième ou troisième édition doivent être préférées à la première qui néglige les monnaies frappées en Italie. Cet ouvrage n'est pas exempt d'erreurs d'attributions, et manque parfois de références quand certaines associations sont affirmées.

De tous les catalogues, manuels ou *corpus* dédiés spécifiquement au monnayage carolingien, aucun n'est exempt d'erreurs ou de lacunes. Les informations contenues dans chacun d'entre eux doivent être considérées avec un regard critique : nombreuses sont par exemple les publications de trésors effectuées par des non-spécialistes qui contiennent des attributions erronées reprises de MG en jugeant cette source sûre. Les ouvrages généraux doivent être considérés comme des bases de données auxquelles on pourra se reporter en première approche pour identifier un type précis. Prou est indispensable pour l'étude de la collection de la BnF, et MG constitue une base d'informations considérable pour la présentation des variétés de types monétaires.

Plus que les catalogues ou *corpus*, certaines sections d'ouvrages qui ne sont pas entièrement dédiés à la numismatique carolingienne constituent des bases de qualité et des sources de référence pour des études spécifiques.

Bien que la numismatique des premiers carolingiens ne constitue qu'une fraction de l'ensemble des thématiques abordées, le tome 1 de « *Medieval European Coinage* » de Grierson et Blackburn<sup>38</sup> est une excellente source pour la

---

<sup>35</sup> (Morrison et Grunthal, 1967).

<sup>36</sup> Voir (Frère, 1977) ainsi que le supplément (Frère, 1980).

<sup>37</sup> (Depeyrot, 1998).

<sup>38</sup> (Grierson et Blackburn, 1986). Désigné « MEC » dans la suite. Voir p. 190-240 et Pl. 33-44 pour la période étudiée ici.



compréhension des monnayages de cette période. Des aspects spécifiques de certains types monétaires y sont abordés ; certains autres ont été négligés faute de place. L'information y est le plus souvent sûre et d'actualité. La section consacrée au monnayage carolingien rédigée par Blackburn dans le second volume du « *New Cambridge Medieval History* » peut également être consultée<sup>39</sup>.

La consultation de publications spécifiques à certains souverains ou certains monnayages est l'approche la plus efficace pour comprendre le monnayage carolingien dans son ensemble.

L'article de Lafaurie qui traite de l'évolution de la numismatique des Mérovingiens aux Carolingiens est la principale source d'informations pour les monnaies de Pépin le Bref, ainsi que pour celles de Carloman<sup>40</sup>.

Le même article de Lafaurie contient des informations importantes pour la compréhension des émissions de Charlemagne antérieures à la réforme de 793/4, en particulier au sujet de certaines attributions. Plus généralement sur les monnaies de Charlemagne, les deux principales contributions sont celle de Grierson, et celle plus récente de Coupland qui complète la précédente<sup>41</sup>. Les problématiques spécifiques aux monnaies impériales au buste de Charlemagne sont abordées par Lafaurie<sup>42</sup>.

Pour le monnayage de Louis roi d'Aquitaine, la seule contribution d'importance est celle qui a fait suite à la découverte du trésor de Larino (Molise, Italie), qui constitue l'essentiel des pièces connues pour ce type monétaire<sup>43</sup>.

L'article de synthèse de Coupland est la principale source et la plus récente qui étudie de manière approfondie les émissions de Louis le Pieux dans leur ensemble<sup>44</sup>.

Coupland est également à l'origine de la seule synthèse sur les monnaies au nom de Pépin d'Aquitaine<sup>45</sup>.

La seule publication d'une étude spécifique au monnayage de Lothaire est l'œuvre de Coupland<sup>46</sup>. Les connaissances établies par les études antérieures y sont compilées, et l'auteur propose de nouvelles hypothèses de chronologie et d'attribution pour les différents types de ce souverain.

---

<sup>39</sup> (Blackburn, 1995).

<sup>40</sup> (Lafaurie, 1974).

<sup>41</sup> (Grierson, 1967) et (Coupland, 2005).

<sup>42</sup> (Lafaurie, 1978).

<sup>43</sup> (de Benedettis et Lafaurie, 1998).

<sup>44</sup> (Coupland, 1990).

<sup>45</sup> (Coupland, 1989).

<sup>46</sup> (Coupland, 2001).

La répartition des publications ayant traité de l'étude des types monétaires frappés au nom de Charles le Chauve est déséquilibrée. Les interprétations de l'édit de Pîtres de 864, et les études sur les monnaies qui en résultent sont relativement nombreuses. Coupland a étudié de manière approfondie les émissions de Charles le Chauve antérieures à 864 qui avaient été largement négligées par le passé<sup>47</sup>. Les travaux de Lafaurie sur l'édit de Pîtres sont essentiels pour la compréhension des émissions monétaires qui en résultent<sup>48</sup>. La contribution de Van Rey est également utile à la connaissance de la numismatique de Charles le Chauve<sup>49</sup>.

La récente publication de Rovelli doit également être mentionnée : elle constitue une excellente synthèse pour le monnayage carolingien d'Italie<sup>50</sup>.

Cette brève étude bibliographique met en avant trois principaux auteurs ayant traité de numismatique carolingienne : Grierson et Lafaurie d'une part, qui ont largement contribué à faire avancer la connaissance de ces monnaies durant plusieurs décennies ; Coupland d'autre part, qui plus récemment a redonné un souffle à l'étude de certains monnayages, et proposé à la communauté de nouvelles hypothèses de travail<sup>51</sup>. Les articles de Coupland présentent l'avantage d'être les plus récents. Des trésors dont Grierson ne pouvait avoir eu connaissance lors de la rédaction de sa publication générale sur les monnaies de Charlemagne<sup>52</sup> sont ainsi par exemple pris en compte dans le travail de recherche dédié à ce même souverain présenté par Coupland<sup>53</sup>.

Les recueils de trésors de la période carolingienne constituent un autre type de support de recherche essentiel, mais par nature rapidement lacunaire. Un ouvrage de compilation de trésors monétaires est, plus encore que les études numismatiques pures, un travail éphémère dont la validité décline avec les années. Pour la période carolingienne, le choix délibéré des auteurs de consacrer leurs études à une fraction seulement de ce qui fut le territoire de l'empire, ou la limitation à une période précise, peuvent fausser l'interprétation qui aurait été faite de données complètes.

Trois ouvrages principaux peuvent être utilisés pour une vue d'ensemble des trésors monétaires.

---

<sup>47</sup> (Coupland, 1991).

<sup>48</sup> (Lafaurie, 1968 ; Lafaurie, 1977 ; Lafaurie, 1981).

<sup>49</sup> (Van Rey, 1972).

<sup>50</sup> (Rovelli, sous presse).

<sup>51</sup> Voir (Coupland, 2007) pour une compilation de l'ensemble des publications antérieures de cet auteur relatives aux monnaies carolingiennes.

<sup>52</sup> (Grierson, 1967).

<sup>53</sup> (Coupland, 2005).

La contribution de Völckers dans cette catégorie est de qualité mais présente deux principaux défauts dont seul le premier est le fait de l'auteur<sup>54</sup>. Premièrement, la période couverte est relativement restreinte : les années 751-812 – et non 800 comme le pensait Völckers – sont ainsi seules concernées, soit celles des règnes de Pépin le Bref et de Charlemagne jusqu'à l'introduction des deniers impériaux au buste. Louis le Pieux et ses successeurs sont ainsi exclus de cette étude. Deuxièmement, les quelque quatre décennies qui nous séparent de l'année de publication de cet ouvrage privent le lecteur de nombreuses découvertes postérieures. La connaissance du monnayage de Pépin le Bref, pour ne citer que cet exemple, a considérablement avancé grâce à la mise au jour de nouvelles trouvailles d'une importance cruciale.

Le recueil de trésors de Duplessy<sup>55</sup> est relativement récent et complet mais présente le défaut de ne répertorier que des trouvailles localisées dans la France actuelle. Cela nous prive des découvertes nombreuses des Pays-Bas, de Belgique, d'Allemagne, de Suisse et d'Italie pour l'essentiel, dont la prise en compte est indispensable pour les souverains carolingiens.

La base constituée par Haertle<sup>56</sup> est la plus complète et la plus récente pour l'étude des trésors carolingiens. L'auteur s'est toutefois focalisé sur les trésors dont il date l'enfouissement du IX<sup>e</sup> siècle, ce qui signifie que les premières trouvailles mentionnées sont celles du début du règne de Louis le Pieux. Les trésors constitués majoritairement de monnaies de Pépin le Bref et Charlemagne n'y figurent donc pas. Quelques erreurs demeurent de plus dans ce recueil, notamment l'attribution quasi-systématique des deniers de Melle et des oboles au monogramme carolin à Charles le Chauve alors que la discussion est ouverte pour certains, et l'attribution à Charlemagne très probable pour d'autres<sup>57</sup>.

A l'instar des ouvrages généraux sur la numismatique carolingienne, les recueils de trésors datés de cette période sont imparfaits et leur consultation doit se faire de manière critique. Ici encore, la lecture doit se faire à la lumière des

---

<sup>54</sup> (Völckers, 1965).

<sup>55</sup> (Duplessy, 1985).

<sup>56</sup> (Haertle, 1997).

<sup>57</sup> Par exemple l'attribution de l'obole melloise du trésor de Château-Roussillon (66) à Charles le Chauve est très certainement erronée : cette pièce a en effet été découverte avec des deniers au monogramme de Bourges (légende BITVRICAS), Narbonne, Pavie, Toulouse (TOLVSA) et Tours. Des monnaies de ce type pour tous ces ateliers à l'exception de celui de Bourges sont avec certitude de Charlemagne et non de Charles le Chauve. En conséquence, le denier de Bourges et l'obole de Melle, dont l'attribution à l'un de ces deux souverains aurait été impossible si ces pièces avaient été découvertes seules, sont dans ce contexte très vraisemblablement de l'époque de Charlemagne. Pour une critique générale de l'ouvrage de Haertle, voir Coupland dans *Numismatic Chronicle* 1999 p. 379-382.

publications spécifiques à chaque problématique pour que les informations contenues dans ces recueils soient exploitées au mieux.

## **C. Les types monétaires étudiés**

La plus grande partie des monnaies de notre *corpus* d'analyse provient de la collection du Cabinet des Médailles de la Bibliothèque nationale de France (BnF). L'essentiel de cette collection est référencé et décrit dans le catalogue publié par Maurice Prou à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Certaines acquisitions ultérieures ont enrichi la collection nationale française et se sont ajoutées à ce *corpus*. Quelques monnaies d'autres collections, de musées ou de particuliers ont également été ajoutées afin de contribuer à répondre à des problématiques précises : des exemplaires conservés à la Monnaie de Paris, au musée Dobrée de Nantes, au musée des Mines des rois Francs de Melle, ainsi que des pièces de la collection personnelle de M. McCormick et des monnaies prêtées par A. Clairand de la Compagnie Générale de Bourse, ont ainsi été analysées.

Les analyses de monnaies carolingiennes ont porté sur des exemplaires émis par les premiers souverains représentant cette dynastie, depuis l'avènement de Pépin le Bref en 751 jusqu'en 855 pour Lothaire et jusqu'au-delà de 864 pour Charles le Chauve. Les analyses sont systématiques pour les monnaies de la BnF de Pépin le Bref, de Charlemagne, pour les deux premiers types de Louis le Pieux, de Pépin I<sup>er</sup> et Pépin II d'Aquitaine, et de Lothaire. Pour les autres types monétaires, les analyses sont destinées à estimer le titre durant une période (Louis le Pieux Type 3, Charles le Chauve avant et après l'édit de Pîtres) ou à étudier des problématiques précises (monnaies au monogramme carolin incertaines, émissions de Melle, corrélation des analyses avec un classement numismatique).

### **I. La définition du cadre chronologique**

Les analyses entreprises dans le cadre de cette thèse s'inscrivent dans un cadre chronologique défini par des problématiques précises. Le titre d'argent des monnaies ainsi que les teneurs en éléments mineurs et traces sont les deux types de données qui peuvent être utilisées pour l'interprétation historique des résultats, et dont les liens possibles avec des questions historiques ont servi de support à la définition de notre cadre chronologique.

La période qui a été privilégiée pour le choix des monnaies constituant le *corpus* s'étend des premières émissions carolingiennes sous Pépin le Bref au début

des années 820 sous Louis le Pieux. L'intégralité des deniers et oboles frappés aux noms de Pépin le Bref, Charlemagne et Louis le Pieux entre 751 et 822 conservés à la BnF a ainsi été analysée. Cette période présente plusieurs caractéristiques qui justifient de se focaliser sur l'étude des monnaies émises durant ces années à travers leur composition. Les transitions des règnes, de Pépin le Bref à Charlemagne et de Charlemagne à Louis le Pieux, ont été particulièrement étudiées. L'attention a également porté sur les conséquences de la réforme de Charlemagne de 793/4, événement fondateur de la frappe monétaire pour l'ensemble du Moyen Age. Des particularités régionales ou locales du point de vue du titre d'argent sont étudiées à la lumière des données numismatiques et de la connaissance de la circulation monétaire à travers les trésors.

Les quelques décennies qui encadrent l'an 800 sont de plus d'un intérêt particulier pour l'étude des relations commerciales qu'entretenaient les Carolingiens avec d'autres populations. L'essor de l'activité de comptoirs commerciaux de la Manche et de la mer du Nord comme Quentovic et Dorestad d'une part<sup>58</sup>, et de Venise sur l'Adriatique d'autre part<sup>59</sup>, peut être daté de ces années. La question de l'origine de l'argent utilisé pour la frappe monétaire dans le territoire carolingien a été étudiée à travers les monnaies issues de ces ateliers. Une attention particulière a également été portée aux émissions de l'atelier de Melle, qui semblent avoir été parmi les plus nombreuses. Le statut de principal producteur d'argent de la période carolingienne du gisement associé à cet atelier, bien que son influence réelle sur l'ensemble de la frappe monétaire demeure floue<sup>60</sup>, justifie une étude spécifique. La problématique de l'origine de l'argent carolingien est donc centrale dans cette étude. La possibilité de mesurer un grand nombre d'éléments-traces avec des limites de détection très basses qu'offre la méthode d'analyse employée constitue un avantage certain pour ce type de recherche.

C'est l'année 823, qui marque l'arrêt de la frappe des monnaies du Type 2 de Louis le Pieux, qui a été définie comme celle de la fin de la principale période chronologique définie. Plusieurs raisons ont justifié ce choix. Le nombre de

---

<sup>58</sup> Pour Dorestad : « *les fouilles de Dorestad ont montré que ce grand comptoir a connu un accroissement « explosif » de son activité entre les années 780 et 820 environ.* » dans (Hodges et Whitehouse, 1996) p. 110 ; pour Quentovic : « *l'apogée du commerce entre la Neustrie et les royaumes anglo-saxons [dont Quentovic serait le pivot pour la partie carolingienne] se place probablement entre 790 et 830 environ* », dans (Hodges et Whitehouse, 1996) p. 110. Voir également (Hodges et Whitehouse, 1996) p. 95-96. La datation de la période d'activité la plus intense pour Dorestad proposée par Coupland est la même que celle de Hodges et Whitehouse citée dans cette note, mais plus tardive pour Quentovic, durant le règne de Charles le Chauve. Voir (Coupland, 2002) p. 210-212.

<sup>59</sup> Voir à ce sujet (McCormick, 2007) et (McCormick, 2001) p. 523-547.

<sup>60</sup> Voir (Barrandon et Dumas, 1990) et (Téreygeol *et al.*, 2005).

monnaies pour la période 751-822 est conséquent, et les problématiques propres à cette période sont nombreuses. L'ajout de l'ensemble des monnaies de la période suivante, relativement nombreuses, aurait sensiblement augmenté notre *corpus*. La problématique de l'étude de ce type monétaire apparu en 822/3 diffère largement de celle de la plupart des monnaies carolingiennes antérieures : celles du Type 3 de Louis le Pieux ne portent en effet pas la mention de l'atelier émetteur sur leur revers. L'interprétation des résultats analytiques obtenus pour ces échantillons est donc plus complexe que pour les émissions précédentes ; l'étude spécifique des ateliers des comptoirs du nord du territoire carolingien, de Venise et de Melle, est impossible pour de telles pièces. Pour ce type comme pour d'autres encore ultérieurs, seuls quelques échantillons ont été intégrés à notre *corpus* afin d'estimer seulement leur titre d'argent et d'étudier la continuité de certaines tendances observées pour les pièces plus anciennes. Des monnaies du Type 3 de Louis le Pieux et de Charles le Chauve antérieures et postérieures à l'édit de Pîtres de 864 ont donc été analysées. L'intérêt pour le commerce à longue distance à partir de l'Italie et de la Frise nous a de plus conduit à prolonger la chronologie pour ces deux zones. C'est donc logiquement que les monnaies de Lothaire ont été incluses à notre *corpus*. Les pièces de ce souverain sont relativement peu nombreuses, et leurs lieux d'émissions regroupés dans des régions situées aux marges du territoire carolingien qui ont démontré une activité commerciale durant ces années ou les précédentes. Il a donc été possible d'analyser l'intégralité des pièces au nom de Lothaire de la BnF. Le monnayage de Louis le Germanique a en revanche été négligé : aucune problématique apparue pour des types antérieurs n'a justifié d'étudier les monnaies émises au nom de ce souverain.

La chronologie du *corpus* des monnaies étudiées peut donc être définie ainsi : de 751 à 822, les exemplaires de la BnF ont été analysés de manière exhaustive, et jusqu'en 840 pour certains types seulement pour ce que l'on peut appeler le territoire carolingien au sens large ; puis de 840 à 877 également de manière sélective pour la Francie Occidentale de Charles le Chauve, et exhaustivement entre 840 et 855 pour la Francie Médiane de Lothaire.

## **II. Présentation des types monétaires étudiés**

### **1. Nomenclature**

Certains des noms portés par les rois carolingiens sont communs à plusieurs représentants de souverains de cette dynastie. Charles et Louis sont les plus courants, mais on dénombre également plusieurs Pépin, Lothaire ou Carloman. La

définition de la correspondance entre les noms employés dans la suite de ce texte et les souverains auxquels ils se réfèrent doit être établie pour une meilleure compréhension.

Les noms « d'usage » ou surnoms ont le plus souvent été préférés à ceux faisant référence au numéro d'apparition du nom dans la dynastie.

Le fils de Charles Martel devenu Maire du palais puis roi des Francs du nom de Pépin est appelé Pépin le Bref. L'usage général dans la littérature numismatique a été préféré à l'appellation plus « historique » de Pépin III qui fait référence aux ancêtres du premier carolingien à porter le titre de roi.

Le choix de Charlemagne semble évident tant l'usage est répandu de nommer le premier empereur carolingien par son titre faisant référence à sa « grandeur », et non « Charles I<sup>er</sup> ».

L'héritier de Charlemagne à la tête de l'empire carolingien est son fils Louis. Louis I<sup>er</sup>, donc, puisqu'il s'agit du premier souverain de ce nom. Le qualificatif de « Débonnaire », très en vogue au XIX<sup>e</sup> siècle, a depuis été délaissé au profit de « Pieux », utilisé de son vivant, qui valorise les liens de ce souverain avec l'Eglise. L'appellation « Louis le Pieux » a donc été adoptée.

Les héritiers de Louis le Pieux sont également désignés selon leur nom d'usage : en Francie Occidentale, Charles II est appelé Charles le Chauve ; en Francie Médiante, Lothaire I<sup>er</sup> est dénommé simplement Lothaire ; l'appellation « Louis le Germanique » a été employée pour Louis II, roi de Francie Orientale ; le fils de Louis le Pieux, Pépin, et son héritier qui porte le même prénom, ont été désignés « Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine » et « Pépin II d'Aquitaine ».

## **2. Le découpage chronologique**

Les dates de mort des souverains carolingiens, ainsi que les années de leur sacre ou couronnement, sont le plus souvent connues avec précision. Le découpage chronologique des différentes émissions monétaires de chacun des membres de la dynastie carolingienne a en revanche été revu de nombreuses fois et débattu entre numismates. Certains consensus semblent s'être faits à l'heure actuelle pour les différentes périodes d'émission de Carloman, de Charlemagne et de Louis le Pieux. Pour Pépin le Bref, Pépin I<sup>er</sup> et Pépin II d'Aquitaine, Lothaire et Charles le Chauve, certaines incertitudes demeurent. Les discussions sur la proposition d'une date ou d'une autre apparaissent s'il y a lieu dans les paragraphes spécifiques à chaque type monétaire étudié. Malgré l'existence de plusieurs types différents, certaines périodes ont été laissées délibérément unitaires du fait de l'absence de découpage chronologique satisfaisant qui correspondrait à la frappe de chacun. C'est le cas

pour les règnes de Pépin le Bref, de Pépin II d'Aquitaine, de Lothaire et de Charles le Chauve.

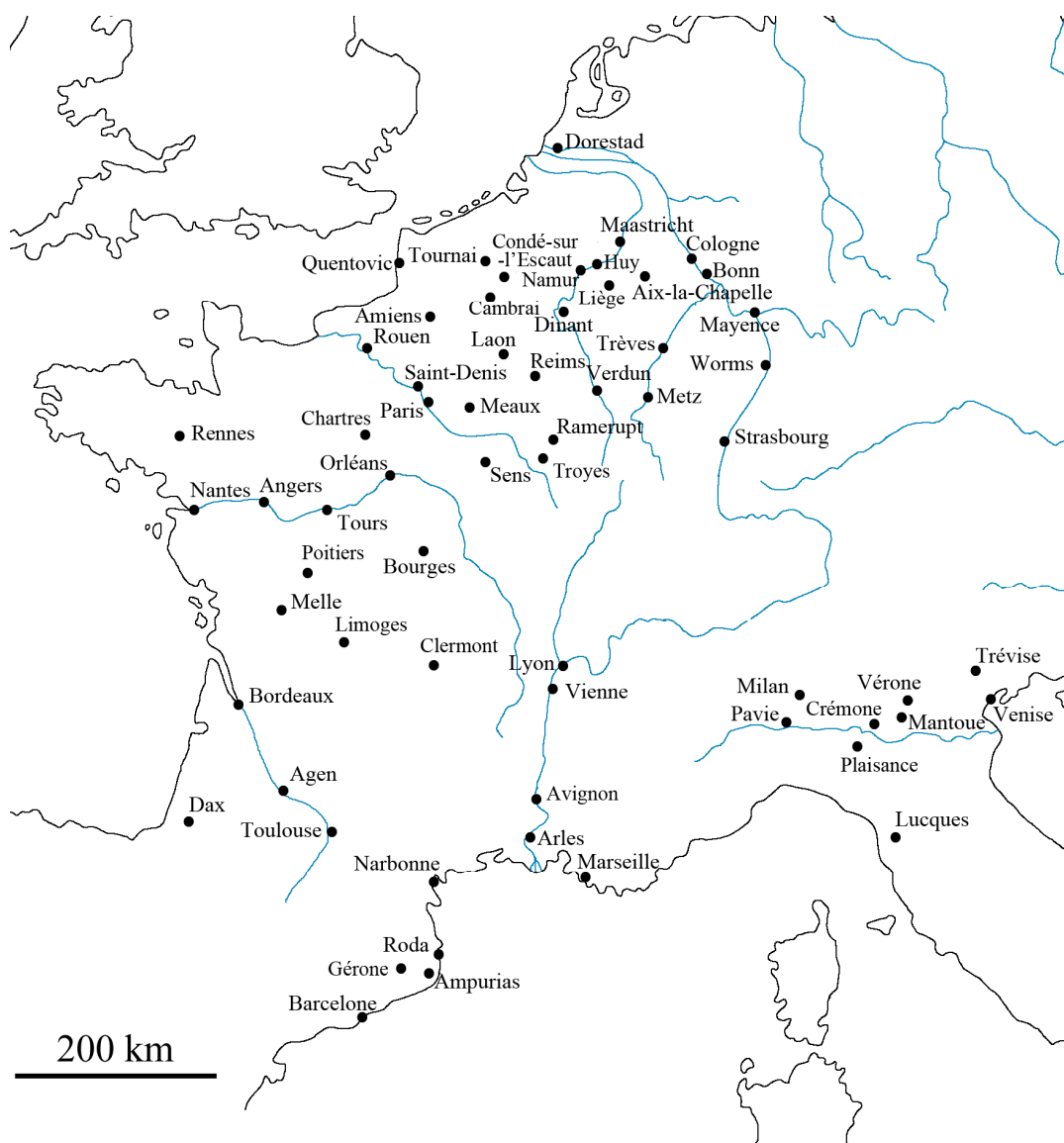
Le découpage chronologique suivant a été adopté pour les émissions principales : Pépin le Bref (751-768) ; Charlemagne Type 1 (768-771) ; Charlemagne Type 2 (771-793/4) ; Charlemagne Type 3 (793/4-812) ; Charlemagne Type 4 (812-814) ; Louis le Pieux Type 1 (814-818) ; Louis le Pieux Type 2 (818-822/3) ; Louis le Pieux Type 3 (822/3-840) ; Lothaire (840-855) ; Charles le Chauve Première période (840-864) ; Charles le Chauve Deuxième période (864-877). Pour les émissions secondaires : Carloman (768-771) ; Louis roi d'Aquitaine (781-793/4) ; Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine (817-838) ; Pépin II d'Aquitaine (839-852). Pour les émissions du Type 2 de Charlemagne en Italie : 781-793/4.

Les Types 1 et 2 de Charlemagne sont parfois regroupés sous l'appellation « Charlemagne Première période », qui concerne l'ensemble des monnaies frappées au nom de ce souverain avant la réforme de l'hiver 793/4 ; de même, « Charlemagne Deuxième période » désigne l'ensemble des monnaies royales et impériales postérieures à cette réforme.

Les types monétaires étudiés dans le cadre de cette thèse sont présentés chronologiquement dans les paragraphes qui suivent.

La Figure 71 représente la localisation géographique des ateliers monétaires connus ou supposés des monnaies carolingiennes de notre *corpus*.





**Figure 71** - Carte des lieux d'émission connus ou supposés des monnaies carolingiennes analysées.

### 3. Pépin le Bref (751-768)

Pépin le Bref se fait élire roi des Francs en 751, après avoir été Maire du Palais de Neustrie et d'Austrasie. Il parvient à rétablir une unité dans les types de droit des monnaies : la mention du nom du souverain sur chaque pièce est à nouveau imposée après avoir été abandonnée à la fin de la période mérovingienne. Il instaure pour la frappe des deniers un standard de masse estimé à un peu plus de 1,2 g<sup>61</sup>. Il s'agissait vraisemblablement d'éliminer de la circulation les anciennes

<sup>61</sup> 1,22 g pour Lafaurie (Lafaurie, 1974) p. 35, 1,24 g dans MEC p. 204.

monnaies mérovingiennes de 1,1 g. Les deniers carolingiens sont plus fins et leurs flans plus larges que les pièces mérovingiennes. Leur forme circulaire est en outre plus régulière, et leur géométrie plus uniforme.

Il semble que l'émission des deniers au nom de Pépin le Bref se divise en deux phases : dans un premier temps, les monnaies portent au droit le monogramme RP dans le champ pour *Rex Pippinus* (Figure 72). Une légende linéaire apparaît au revers dans le champ en une ou deux lignes le plus souvent, mais certains exemplaires présentent une légende circulaire, un monogramme, un symbole dans le champ ou une représentation humaine. Dans un deuxième temps, les monnaies de Pépin le Bref portent au droit la légende RxF (*Rex Francorum*, roi des Francs) tandis que les revers conservent des formes variées (Figure 73). Pour les deux sous-types présentés, les légendes de droit sont accompagnées le plus souvent d'un ou plusieurs globules. Certains ateliers semblent avoir maintenu le type de droit avec la légende RP jusqu'à la fin du règne de Pépin le Bref. Pour les autres, la transition pourrait être datée du capitulaire de Ver de 755. Cependant, la rareté des deniers à la légende RxF au droit par rapport à ceux portant RP est difficilement compatible avec les durées de ces émissions si l'on se fonde sur une transition RP puis RxF en 755<sup>62</sup>. Peut-être alors les deux types ont-ils coexisté pour tous les ateliers ou certains d'entre eux durant l'ensemble du règne de Pépin le Bref ? La question de l'évolution typologique possible des deniers du premier souverain carolingien a été étudiée à partir des résultats des analyses élémentaires.



**Figure 72** - Exemple de denier de Pépin au type de droit RP frappé entre 751 et 768 (Prou 227 de l'église Saint Firmin d'Amiens).



**Figure 73** - Exemple de denier de Pépin au type de droit RxF frappé entre 751 et 768 (Prou 142 de Verdun).

Quelques variétés existent parmi les deniers de Pépin le Bref qui ne peuvent être rattachées de manière satisfaisante à l'un des deux types principaux RP ou RxF. Parmi ces exemplaires, certains portent au droit une légende composée des

---

<sup>62</sup> (Lafaurie, 1974) p. 37.

lettres Pi répétées de part et d'autre d'une croix centrale, puis une seconde ligne qui peut être extrapolée comme RE ou REX (Prou 439). Le nom de l'atelier émetteur apparaît en légende circulaire au revers. D'autres monnaies attribuées à Pépin le Bref et qui ne correspondent à aucun des deux sous-types RP ou RF peuvent également être décrites : l'une porte au droit la légende PiP/hAG en deux lignes et au revers RxF (BnF 925a) ; une autre présente au droit la légende ΠPIPI au-dessus d'une hache posée horizontalement, et au revers RP (Prou 980). Enfin, des deniers portent au revers non pas le nom de l'atelier émetteur mais ce que l'on a interprété comme le nom d'un monétaire<sup>63</sup>.

Les difficultés de lecture de certains caractères, symboles ou monogrammes au revers des monnaies de Pépin le Bref posent des problèmes pour leur attribution à un atelier de frappe. Les lieux d'émission peuvent de plus demeurer incertains pour des exemplaires dont les légendes de revers sont lisibles mais pour lesquelles aucune attribution n'est satisfaisante. Quarante types différents de deniers de ce souverain sont connus d'après MEC. Selon Lafaurie, trente des quatre-vingt-trois pièces de Pépin le Bref recensées dans MG sont attribuables à quatorze ateliers monétaires. Les lieux d'émission des autres deniers restent énigmatiques<sup>64</sup>.

Le principal trésor contenant des monnaies de Pépin le Bref est celui mis au jour à Imphy (58) en 1857. Soixante-trois de ces deniers s'y trouvaient avec quatre de Carloman et trente-trois de Charlemagne antérieurs à 793/4. D'après Grierson et Blackburn, un tiers des monnaies de Pépin le Bref connues proviendrait de cette trouvaille<sup>65</sup>. C'est dire la rareté des pièces du premier roi carolingien. Le principal trésor homogène de deniers de Pépin le Bref est celui mis au jour lors des fouilles du comptoir commercial Dorestad. Cette trouvaille découverte en 1972 contenait vingt-cinq pièces de Pépin le Bref<sup>66</sup>. Deux exemplaires seulement parmi eux ne portent pas de hache caractéristique au revers qui pourrait signifier qu'ils auraient été frappés dans l'atelier monétaire de l'*emporium* frison.

Une seule obole au nom de Pépin le Bref, de l'atelier de Trèves, est répertoriée dans la littérature<sup>67</sup>. Cette pièce provient de la trouvaille de Domburg

---

<sup>63</sup> Voir à ce sujet (Lafaurie, 1974) p. 41-42. Le terme de « monétaire » désigne en numismatique carolingienne un personnage important qui supervise la frappe des monnaies, et non celui qui exécute cette frappe.

<sup>64</sup> (Lafaurie, 1974) p. 35.

<sup>65</sup> MEC p. 203.

<sup>66</sup> (Van Es et Verwers, 1980), p. 212.

<sup>67</sup> (Weiller, 1988) p. 267. Les légendes sont au droit Δ-N/PI-PI et au revers PTREFER en écriture rétrograde.

(Zélande, Pays-Bas) ; il ne peut donc s'agir d'un faux moderne malgré son caractère exceptionnel. L'existence d'oboles mérovingiennes récemment démontrée<sup>68</sup> renforce le caractère authentique du demi-denier de Pépin le Bref cité.

#### 4. Carloman (768-771)

Les monnaies frappées au nom de Carloman durant les trois années de son règne avec Charlemagne sont particulièrement rares : seuls dix exemplaires seraient connus<sup>69</sup>. Les types de ces deniers poursuivent ceux des émissions de Pépin le Bref. Ils portent, pour ceux qui peuvent être attribués sans aucun doute à Carloman, la légende CAR/LOM dans le champ en deux lignes au droit, et au revers le nom de l'atelier de frappe le plus souvent abrégé.



**Figure 74** - Exemple de denier de Carloman frappé entre 768 et 771 (Prou 762 de Clermont).

D'autres monnaies qui portent au droit un monogramme formé des lettres C, A, R, L et O ont été attribuées par le passé à Carloman. Il semblerait plutôt que les pièces de ce type soient de Charlemagne et non de son frère<sup>70</sup>. Quelques monnaies au monogramme CARLM auraient toutefois bien été frappées par Carloman ; c'est semble-t-il la présence d'un M dans le monogramme qui permet d'attribuer les pièces incertaines à Carloman plutôt qu'à Charlemagne<sup>71</sup> (Figure 74).

#### 5. Charlemagne (768-814)

##### *a. Charlemagne Type 1 (768-771)*

Le premier type monétaire défini pour le règne de Charlemagne est daté de 768 à 771. Il s'agit de monnaies rares et qui n'ont pas toujours été dissociées des autres exemplaires également antérieurs à la réforme de 793/4, mais postérieurs à 771. Les monnaies du Type 1 de Charlemagne reprennent les caractéristiques des deniers de Pépin le Bref : le nom du souverain apparaît au droit le plus souvent et le

---

<sup>68</sup> (Dhénin et Schiesser, 2007).

<sup>69</sup> (Crinon, 2004) p. 246.

<sup>70</sup> « *Les deniers du groupe CARLO ou CAROL doivent être restitués à Charlemagne.* » dans (Lafaurie, 1974) p. 40.

<sup>71</sup> (Lafaurie, 1974) p. 40, (Grierson, 1967) p. 512 n. 55 et (Crinon, 2004) p. 246.

nom du lieu d'émission au revers (Figure 75). Les standards de masse et de module restent ceux introduits par le capitulaire de Ver de Pépin le Bref en 755.



**Figure 75** - Exemple de denier du Type 1 de Charlemagne frappé entre 768 et 771 (Prou 448 de Chartres).

Les monnaies de Charlemagne du Type 1 se distinguent des exemplaires plus tardifs car leurs droits ne sont pas uniformisés : tandis que les monnaies du Type 2 portent de manière quasi-systématique la légende CARO/LVS dans le champ en deux lignes, celles du Type 1 présentent plusieurs variantes. Selon Coupland, les légendes au droit des monnaies du Type 1 de Charlemagne peuvent être CAR/LVS en deux lignes ou CA/ROL'/REX FR en trois lignes<sup>72</sup>. D'après la description d'une monnaie de ce type dans les planches de MEC<sup>73</sup>, celles du Type 1 peuvent se distinguer de celles du Type 2 car le A et le R de la légende du droit ne sont pas ligaturés, et le nom de Charles ne comporte pas de O (CAR/LVS pour le Type 1 et CARO/LVS pour le Type 2). Grierson mentionne les mêmes types de droit que Coupland, auxquels s'ajoute un autre dont la légende est KARx dans le champ, avec un F horizontal posé dessous<sup>74</sup>.

Grierson avance que les monnayeurs devaient faire apparaître le nom du roi sur les monnaies sans qu'il leur soit donné davantage de précisions<sup>75</sup>. Cela expliquerait la variété de types de droit observés pour cette période.

#### ***b. Charlemagne Type 2 (771-793/4)***

On suppose que l'émission des deniers de Charlemagne du Type 2 a commencé après la mort de son frère Carloman en 771. La masse des deniers reste inchangée par rapport aux frappes carolingiennes antérieures, de l'ordre de 1,3 g. Les monnaies du Type 2 de Charlemagne montrent une progression dans l'uniformisation des légendes : à de rares exceptions près, les deniers frappés entre 771 et 793/4 portent au droit la légende CARO/LVS dans le champ en deux lignes (Figure 76). Le A et le R sont ligaturés ; le O est le plus souvent plus petit que les autres lettres de la légende. Au revers, le nom de l'atelier émetteur apparaît dans la

<sup>72</sup> (Coupland, 2005) p. 213.

<sup>73</sup> MEC Pl. 33, monnaie référencée 1.721.

<sup>74</sup> (Grierson, 1967) p. 511.

<sup>75</sup> (Grierson, 1967) p. 511.

majorité des cas dans le champ en une à trois lignes, parfois séparées par un trait ou un grènetis, mais parfois aussi en cercle ou dans les cantons d'une croix centrale. Certaines légendes de revers comportent des signes ou symboles dont le sens n'a pu être compris. Bien que le nom du roi Charles apparaisse systématiquement au droit de ces deniers, leurs types ne sont pas uniformisés comme on l'observera pour les Types suivants de Charlemagne et pour Louis le Pieux.

Dans une mesure moindre que durant le règne de Pépin le Bref, quelques deniers de Charlemagne antérieurs à la réforme de 793/4 portent encore des noms de personnages<sup>76</sup>.



**Figure 76** - Exemple de denier du Type 2 de Charlemagne frappé entre 771 et 793/4 (Prou 87 de Maastricht).

Le Type 2 de Charlemagne est celui de la période 751-864 pour lequel le plus grand nombre d'ateliers monétaires sont identifiés. Cent officines au moins auraient fonctionné d'après Grierson et Blackburn<sup>77</sup>. La plupart d'entre elles sont situées entre la Loire et le Rhin : l'Aquitaine et la Septimanie, récemment conquises, ne sont que peu représentées.

Les principales trouvailles de monnaies de Charlemagne antérieures à la réforme de 793/4 se trouvent dans la partie est de la France, en Suisse, et en Allemagne actuelles<sup>78</sup>. Cela constitue une évolution par rapport à la période mérovingienne pour laquelle les trésors proviennent majoritairement de l'ouest de la France moderne<sup>79</sup>. Coupland différencie deux zones principales de trouvailles de trésors de monnaies de Charlemagne antérieures à la réforme de 793/4 : la première est située au nord du Rhin, et la seconde s'étend de l'est de la France vers la Suisse et jusqu'en Italie<sup>80</sup>. L'un des trésors du premier groupe est remarquable au regard de sa localisation et de sa composition : la trouvaille de Prerow-Darss<sup>81</sup> (Mecklenbourg-Poméranie, Allemagne) est en effet située en dehors des limites du territoire franc, et les deux deniers carolingiens du type antérieur à la réforme de 793/4 s'y trouvaient avec soixante-sept dirhams arabes. Le trésor d'Ilanz (Grisons,

---

<sup>76</sup> (Lafaurie, 1974) p. 41.

<sup>77</sup> MEC p. 207.

<sup>78</sup> (Lafaurie, 1974) p.32-33.

<sup>79</sup> (Lafaurie, 1974) p. 33.

<sup>80</sup> (Coupland, 2005) p. 214-215.

<sup>81</sup> Trésor MG 163 p. 391.

Suisse) est également singulier car il est composé de tiers de sou d'or ou *tremisses* de Charlemagne frappés en Italie, de deniers d'argent carolingiens majoritairement antérieurs à la réforme de 793/4, mais également de deux dirhams arabes contemporains<sup>82</sup>.

C'est durant la période d'émission des monnaies du Type 2, en 774, que Charlemagne conquiert le royaume Lombard et prend le contrôle de l'Italie du nord. L'introduction de la frappe de monnaies au type carolingien en Italie fait probablement suite au capitulaire de Mantoue daté de 781<sup>83</sup>.

Durant les premières années consécutives à la conquête du royaume Lombard, les ateliers de frappe ayant fonctionné en Italie du nord sous le dernier roi Didier ont continué d'émettre des *tremisses* d'or selon la tradition lombarde. Le nom de Charlemagne remplace sur ces monnaies celui de Didier, dernier souverain du royaume d'Italie<sup>84</sup>. Ces pièces sont essentiellement connues à travers les exemplaires contenus dans le trésor d'Ilanz, conjointement à quarante monnaies de Charlemagne antérieures à la réforme de 793/4, deux postérieures et deux pièces arabes.



**Figure 77** - Exemple de denier du Type 2 de Charlemagne frappé en Italie entre 781 et 793/4 (Prou 894, atelier indéterminé d'Italie).

Grierson sépare les années d'émission des deniers carolingiens en Italie en deux périodes distinctes : durant la première, les monnaies auraient porté au droit la légende CARO/LVS en deux lignes avec le A et le R ligaturés, et au revers RxF, accompagné de lettres supplémentaires ou d'un monogramme, qui indiqueraient l'atelier émetteur (Figure 77)<sup>85</sup>. Les dates de début et de fin d'émission de ces pièces seraient respectivement 781 et 786 selon Grierson. Lafaurie identifie plusieurs noms de villes potentiels pour élucider les monogrammes énigmatiques

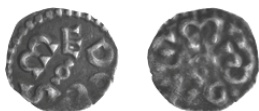
<sup>82</sup> Voir sur ce trésor (Bernareggi, 1977) et (Bernareggi, 1983).

<sup>83</sup> (Grierson, 1967) p. 506 et (Grierson, 1954a).

<sup>84</sup> Sur le monnayage Lombard et les premières émissions carolingiennes en Italie voir (Rovelli, sous presse).

<sup>85</sup> Selon Coupland, les deniers italiens de Charlemagne antérieurs à la réforme de 793/4 se distinguent des exemplaires de la même période frappés de l'autre côté des Alpes par trois éléments : « *the flans were larger than those of the rest of the empire ; the lettering was sprawling and spiky ; the RF legend on the reverse was accompanied by a letter or group of letters indicating the mint.* ». Voir (Coupland, 2005) p. 216-217.

présents au revers de ces deniers : Milan, Bergame et Plaisance<sup>86</sup>. D'autres propositions moins convaincantes ont été faites pour les autres lettres ou monogrammes caractéristiques des premières monnaies carolingiennes d'Italie. Durant la seconde période d'émission définie par Grierson, les deniers carolingiens d'Italie auraient porté le nom d'atelier dans le champ au revers.



**Figure 78** - Exemple d'obole du Type 2 de Charlemagne frappé entre 771 et 793/4 (Prou 678 de Melle).

Des oboles peuvent être associées aux deniers du Type 2 de Charlemagne, et donc à la période 771-793/4. Toutes celles qui sont connues portent le nom de Melle. Ces oboles présentent la particularité d'être incuses : seule une des deux faces du flan a été imprimée de la marque d'un coin ; l'autre présente l'empreinte creuse de la frappe de cette première face (Figure 78). Il n'y a donc pas lieu de lire une légende sur leur revers comme l'a fait Prou<sup>87</sup>. Seul le nom de l'atelier apparaît sur une de leurs faces. Il est remarquable que ces monnaies ne portent pas le nom du souverain, au moment même où, après Pépin le Bref, Charlemagne réaffirme l'autorité royale sur la frappe monétaire en imposant son nom sur l'ensemble des pièces émises.

Ces oboles portent des légendes qui les rapprochent de l'atelier de Melle et de l'époque de Charlemagne ; leur masse ainsi que leur module correspondent aux caractéristiques de demi-deniers. La gravure de leur face frappée est de plus identique à celle du revers d'une des variétés de deniers mellois du Type 2 de Charlemagne. C'est donc à ce type que les oboles incuses de Melle doivent être attribuées<sup>88</sup>. Les oboles du type de Prou 678 (Figure 78) ont en conséquence été frappées sous Charlemagne avant la réforme de 793/4, contrairement à l'idée répandue que l'émission de cette espèce n'aurait commencé que sous Louis le Pieux<sup>89</sup>.

---

<sup>86</sup> (Lafaurie, 1972) p. 44-45. Pour une synthèse sur les attributions de deniers italiens antérieurs à la réforme de 793/4 voir (Rovelli, sous presse) p. 9-13.

<sup>87</sup> Prou 678 à Prou 680 p. 96.

<sup>88</sup> Sur les différentes variétés d'oboles de Charlemagne de Melle antérieures à la réforme de 793/4 voir (Schiesser, à paraître).

<sup>89</sup> L'existence d'oboles mérovingiennes puis carolingiennes semble montrer que la frappe de cette espèce est bien antérieure à ce que l'on a longtemps cru. Sur les oboles mérovingiennes voir (Dhénin et Schiesser, 2007) et sur les premières oboles carolingiennes voir (Schiesser, à paraître).



### *c. Louis roi d'Aquitaine (781-793/4)*

Les premières émissions au nom du futur empereur Louis le Pieux remontent à son accession au trône d'Aquitaine en 781<sup>90</sup>. Les deniers frappés au nom de Louis roi d'Aquitaine sont contemporains de ceux de Charlemagne antérieurs à la réforme de 793/4 (Type 2). Le nom du roi apparaît dans le champ en deux lignes au droit sous la forme HLU/DUIH (contraction de CHLO/DVICS), et le nom de l'atelier émetteur de la même manière au revers (Figure 79).



**Figure 79** - Exemple de denier de Louis roi d'Aquitaine frappé entre 781 et 793/4 (BnF 1982-302 de Clermont).

Cinq ateliers de frappe sont connus pour les pièces de Louis roi d'Aquitaine : Clermont en Auvergne, Limoges, Saint-Sulpice de Bourges, Saint-Etienne (probablement de Bourges) et le monastère de Saint-Romain de Blaye près de Bordeaux<sup>91</sup>. Aucune monnaie de ce souverain n'est connue au nom de Melle alors que cet atelier aquitain semble avoir été particulièrement prolifique pour les pièces contemporaines du Type 2 de Charlemagne (771-793/4).

Metcalf pense que les monnaies de Louis roi d'Aquitaine ont été frappées durant quelques années seulement, après 781 et jusqu'en 785<sup>92</sup>. Selon ce même auteur et Coupland, il s'agirait d'une émission de prestige de très faible ampleur<sup>93</sup>.

Trois deniers de Louis roi d'Aquitaine ont été mis au jour conjointement à onze pièces de Charlemagne antérieures à la réforme de 793/4 dans un trésor découvert dans une sépulture à Breuvery-sur-Coole (51) en 1912<sup>94</sup>. Depuis, la trouvaille de monnaies de Louis roi d'Aquitaine à Larino (Molise, Italie) en 1992 a largement contribué à améliorer la connaissance de ce monnayage. Ce trésor est composé de dix-neuf de ces pièces, auxquelles s'ajoute un denier de Charlemagne de Limoges antérieur à la réforme de 793/4<sup>95</sup>. Lafaurie attribue la présence de ce

---

<sup>90</sup> Les monnaies de Louis le Pieux en tant que roi d'Aquitaine apparaissent dans la partie consacrée aux émissions de Charlemagne par souci de cohérence chronologique : bien que le nom du souverain qui apparaît sur ces pièces soit celui de Louis, leur frappe, qui a débuté alors que celui-ci n'était âgé que de trois ans, a en effet été le fait de Charlemagne.

<sup>91</sup> Pour cette dernière attribution plus hypothétique voir (de Benedettis et Lafaurie, 1998) p. 23. (Metcalf, 1968) p. 152.

<sup>92</sup> (Metcalf, 1968) p. 152 et (Coupland, 1990) p. 24.

<sup>93</sup> (Metcalf, 1968) p. 152 et (Coupland, 1990) p. 24.

<sup>94</sup> Sur cette trouvaille voir (Schmit, 1920) et (Metcalf, 1968).

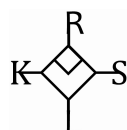
<sup>95</sup> (de Benedettis et Lafaurie, 1998).

trésor de monnaies d'Aquitaine sur le territoire italien « à un soldat aquitain venu en Italie pour quelque incursion.<sup>96</sup> ». Cet auteur avance une période de frappe plus large que celle proposée par Metcalf et citée plus haut. Lafaurie ajoute enfin que le nombre de monnaies frappées au nom de Louis roi d'Aquitaine peut avoir été considérable, ce qui contredit l'idée d'émission de prestige restreinte qui avait cours avant la découverte du trésor de Larino<sup>97</sup>. L'intervalle le plus large a en conséquence été privilégié ici : les bornes fixées pour le monnayage de Louis roi d'Aquitaine sont donc 781, année de son avènement, et 793/4, année de l'introduction du type au monogramme par Charlemagne.

#### *d. Charlemagne Type 3 (793/4-812)*

Les monnaies du Type 3 de Charlemagne dites « au monogramme » apparaissent consécutivement à la réforme de l'hiver 793/4. La disposition prise lors du Capitulaire de Francfort du 11 novembre 793 dans le cadre d'une réforme générale des poids et mesures initiée en 789<sup>98</sup> aurait été effective au début de l'année 794<sup>99</sup>. A cette date, le module des deniers ainsi que leur masse augmentent (de 16 mm à 20 mm, et de 1,3 g à 1,7 g), et l'uniformisation des types devient réelle pour l'ensemble du territoire franc.

Le monogramme dit « carolin » correspond à une forme d'écriture particulière de son nom que Charlemagne a employée pour la signature de textes de lois, avant de le faire figurer sur ses monnaies<sup>100</sup>. Ce monogramme rassemble les sept lettres qui forment KAROLVS, le nom de Charles en latin, sous la forme d'une croix. Les quatre consonnes forment les branches de la croix ; les trois voyelles sont regroupées dans un losange central : le O apparaît sous la forme d'un ◊, les deux côtés inférieurs de ce quadrilatère figurent le V, et un chevron dans le haut du losange forme le A (Figure 80).



**Figure 80** - Le monogramme carolin.

<sup>96</sup> (de Benedettis et Lafaurie, 1998) p. 226.

<sup>97</sup> (de Benedettis et Lafaurie, 1998) p. 239.

<sup>98</sup> (Lafaurie, 1977) p. 487.

<sup>99</sup> (Coupland, 2005) p. 218.

<sup>100</sup> MEC p. 199.

C'est avec ce type au monogramme que Charlemagne achève l'uniformisation des deniers carolingiens : les variétés de types de revers caractéristiques des monnaies du Type 2, ainsi que certaines particularités du monnayage d'Italie, disparaissent avec l'apparition de ce nouveau type. La réduction du nombre d'ateliers monétaires de plus de quatre-vingts à trente environ semble également montrer le renforcement du contrôle de l'autorité carolingienne sur la frappe monétaire à partir de 793/4<sup>101</sup>. La réduction apparente du nombre d'ateliers monétaires peut toutefois également s'expliquer par l'absence de trouvaille d'importance de monnaies de Charlemagne au monogramme<sup>102</sup>.

Si l'on se fonde sur l'importance relative des exemplaires issus des trouvailles de cette période, les officines les plus productives auraient été Melle puis Dorestad, Pavie et Milan<sup>103</sup>. Il est remarquable que les deux principaux ateliers italiens s'affirment parmi les plus productifs de l'ensemble du territoire franc, alors que l'ex-royaume lombard n'a été intégré que dix ans avant l'introduction du denier au monogramme, et que les premières émissions antérieures au type carolingien en Italie se différenciaient des autres.



**Figure 81** - Exemple de denier du Type 3 de Charlemagne frappé entre 793/4 et 812 (Prou 905 de Milan).

Le plus souvent, les monnaies du Type 3 de Charlemagne portent au droit<sup>104</sup> la légende CARLVS REX FR en cercle autour d'une croix ; le nom d'atelier apparaît au revers en cercle autour du monogramme carolin (Figure 81). L'inverse est toutefois régulièrement observé : dans ces cas, la titulature royale est associée au monogramme au droit, et le nom de l'atelier à la croix au revers. En dehors des ateliers italiens, pour lesquels seul le type avec le monogramme au revers est observé, la différenciation ne semble pas correspondre à des particularités géographiques. Les monnaies d'un même atelier sont toutefois homogènes de ce

<sup>101</sup> (Coupland, 2005) p. 221.

<sup>102</sup> Le trésor de Biebrich-Wiesbaden (Hesse, Allemagne) qui pourrait constituer la seule trouvaille d'importance de monnaies du Type 3 de Charlemagne n'a pas été publié. Selon Grierson, quelques pièces issues ce trésor – qui pourrait avoir rassemblé 4000 à 5000 monnaies, mais ce dont le numismate britannique doute – seraient apparues dans des catalogues de vente. Voir (Grierson, 1967), p. 504 n. 26. Sur les circonstances de la trouvaille voir (Diefenbach, 1924) p. 21 n. 4.

<sup>103</sup> (Coupland, 2005) p. 221.

<sup>104</sup> La face sur laquelle apparaît la titulature royale est prise systématiquement pour le droit des monnaies, que le monogramme apparaisse sur cette même face ou sur l'autre.

point de vue. Pour les exemplaires des deux types cités, les cantonnements de la croix sont vides le plus souvent mais peuvent porter un ou plusieurs points ou triangles. Le  $\Lambda$  du monogramme porte parfois un chevron, et les branches du K partent des extrémités de la haste dans certains cas.

Quelques exemplaires de deniers du Type 3 de Charlemagne présentent des variétés typologiques : on peut lire un P à la place de la croix au revers sur quelques monnaies de Mayence (Prou 33), ou de la même manière au centre du nom d'atelier en cercle, une croix au-dessus de degrés pour des exemplaires au nom de « Sennes » (Prou 40), ou encore un monogramme identifiant le nom de la ville de l'atelier de frappe à la place de la croix au droit (Prou 267 de l'église Notre-Dame de Laon). Prou 896 présente un revers singulier avec un monogramme différent et une légende particulière au revers ; l'attribution de cette monnaie est discutée plus loin<sup>105</sup>.

Des monnaies au monogramme carolin ont été émises par Charlemagne entre 793/4 et 812 et par Charles le Chauve à partir de 840. L'attribution de ces pièces à l'un de ces deux souverains a été longuement discutée par le passé. Aujourd'hui encore, certains exemplaires de Melle et de Bourges ne peuvent être attribués avec certitude à l'un des deux rois. Bien que certaines de ces pièces aient été émises durant le règne de Charlemagne, la problématique de ces monnaies d'Aquitaine au monogramme est dissociée de celle des autres exemplaires et développée dans un paragraphe spécifique<sup>106</sup>.

Des exemplaires d'oboles au monogramme ont également été frappés par Charlemagne à partir de 793/4. Ces oboles portant le monogramme carolin ont fréquemment été attribuées par le passé à Charles le Chauve car l'idée était répandue que la frappe des demi-deniers avait commencé sous Louis le Pieux seulement<sup>107</sup>. Il n'en est rien, comme l'a récemment démontré Coupland, et des oboles au monogramme carolin sont attribuables sans discussion possible à Charlemagne : ainsi, des exemplaires au nom de Dorestad sont connus alors que cet *emporium* n'a, à aucun moment, fait partie du territoire de Charles le Chauve<sup>108</sup>. De plus, certains trésors datés indiscutablement de l'époque Charlemagne contiennent

---

<sup>105</sup> Voir *infra* p. 269.

<sup>106</sup> Voir *infra* p. 279. Seules les monnaies au monogramme carolin pour lesquelles l'attribution à Charlemagne est indiscutable sont traitées ici.

<sup>107</sup> MEC p. 206.

<sup>108</sup> (Coupland, 1988a) p. 13 et (Coupland, 2005) p. 220.

quelques-unes de ces oboles<sup>109</sup>. Mais si des oboles de Charlemagne au monogramme existent au nom de Dorestad, la plus grande partie des demi-deniers de ce type est frappée au nom de Melle, et l'essentiel des autres d'ateliers localisés en Aquitaine. Le monogramme carolin remplit le droit de ces oboles des années 793/4-812, et le nom de l'atelier émetteur est inscrit au revers autour d'une croix (Figure 82).



**Figure 82** - Exemple d'obole du Type 3 de Charlemagne frappée entre 793/4 et 812 (Prou 795 d'Agen).

Comme pour les deniers, l'étude numismatique ne permet pas de différencier certaines oboles de Charlemagne de celles de Charles le Chauve. Les oboles frappées à Melle et à Bourges et dont le monogramme carolin remplit le champ sont donc dissociées des autres et pour l'interprétation des résultats des analyses pratiquées sur ces monnaies.

Contrairement au règne de Charles le Chauve, durant lequel des oboles ont été frappées sur lesquelles le monogramme carolin remplit le champ ou portant ce monogramme au centre de la titulature royale, seule des demi-deniers de la première sorte semblent avoir été émis sous Charlemagne.

#### *e. Charlemagne Type 4 (812-814)*

Les deniers du Type 4 de Charlemagne portent au droit l'effigie et la titulature impériale de Charlemagne. Le buste de l'empereur carolingien y apparaît, drapé et lauré à la manière des empereurs romains. Le revers porte selon les ateliers un temple (Figure 83), une porte de ville, un bateau ou des outils de monnayeur.



**Figure 83** - Exemple de denier du Type 4 de Charlemagne frappé entre 812 et 814 (Prou 981 de Mayence).

<sup>109</sup> (Coupland, 2005) p. 220.

Contrairement aux émissions précédentes, une part importante des monnaies du Type 4 de Charlemagne ne fait pas mention de l'atelier émetteur sur le revers<sup>110</sup>. La présence de lettres sous le buste de l'empereur permet néanmoins d'associer certains exemplaires à des noms de villes. Les C, F, M, V ou B qui se trouvent sur le droit de certains de ces deniers indiqueraient respectivement les ateliers de Cologne, Francfort, Mayence, Worms, et Bingen ou Bonn<sup>111</sup>.

Ce type monétaire apparaît non pas après le couronnement de Charlemagne en 800, mais vraisemblablement en 812 suite à la reconnaissance de son titre d'empereur par le Byzantin Michel I<sup>er</sup>. Ces nouveaux deniers sont frappés jusqu'à sa mort en 814. Les trouvailles de deniers du Type 4 de Charlemagne se concentrent dans le nord du territoire carolingien<sup>112</sup>. Ces pièces sont extrêmement rares : seuls trente exemplaires environ sont connus<sup>113</sup>.

## 6. Louis le Pieux (814-840)

### a. Louis le Pieux Type 1 (814-818)

Le premier type monétaire de Louis le Pieux en tant qu'empereur reprend le dernier émis par Charlemagne (Type 4) : on retrouve ainsi au droit l'effigie de l'empereur drapé et lauré. Le nom de l'atelier émetteur apparaît en cercle au revers des monnaies, le plus souvent autour d'une porte de ville, mais aussi pour certains ateliers autour d'un temple (Figure 84), d'un bateau ou d'outils de monnayeur. Les pièces au buste de Louis le Pieux sont frappées vraisemblablement jusqu'en 818.



**Figure 84** - Exemple de denier du Type 1 de Louis le Pieux frappé entre 814 et 818 (Prou 445 de Tours).

Les monnaies du Type 1 de Louis le Pieux sont plus nombreuses que celles du Type 4 de Charlemagne qui les précèdent, et sur lesquelles apparaît également le buste de l'empereur. Ce sont toutefois les pièces les plus rares parmi celles des trois types monétaires du règne de Louis le Pieux : contrairement aux Types 2 et 3,

---

<sup>110</sup> (Lafaurie, 1978).

<sup>111</sup> (Lafaurie, 1978) p. 161 et (Coupland, 2005) p. 224.

<sup>112</sup> (Coupland, 2005) p. 223.

<sup>113</sup> MEC p. 209.

aucun trésor d'importance constitué majoritairement de monnaies au buste de Louis n'a été mis au jour.

La rareté des deniers du Type 1 de Louis le Pieux observée dans les collections modernes ne signifie pas nécessairement qu'un nombre plus faible de ces monnaies a été frappé par rapport à celles du type suivant. L'absence de trésor d'importance daté de 814-818, corrélée à l'efficacité du renouvellement des stocks monétaires en circulation qui transparait des trouvailles monétaires autour de 800, pourrait expliquer le déficit de monnaies de Louis le Pieux du Type 1 observé de nos jours.

Douze ateliers au moins sont identifiés par Coupland pour l'émission de deniers du Type 1 de Louis le Pieux<sup>114</sup>. Ce nombre, s'il est plus élevé que celui des ateliers connus pour les monnaies de Charlemagne au buste, est toutefois nettement plus faible que celui recensé pour les Types 2 et 3 de Charlemagne antérieurs, et pour le Type 2 de Louis le Pieux qui lui succède. La réduction du nombre d'ateliers pour la frappe des monnaies du Type 1 de Louis le Pieux n'est peut-être toutefois qu'apparente, et pourrait s'expliquer par le déficit des exemplaires de ce type dans les trouvailles. Les officines les plus actives auraient été Dorestad et Melle si l'on considère que les deniers au buste de Louis le Pieux qui sont parvenus jusqu'à nous constituent un échantillonnage représentatif de la circulation monétaire entre 814 et 818<sup>115</sup>.

Certains deniers du Type 1 de Louis le Pieux portent au revers non pas le nom de l'atelier émetteur mais la légende XPISTIANA RELIGIO, comme c'était le cas pour une proportion importante des deniers au buste de Charlemagne<sup>116</sup>. Ces monnaies de Charlemagne ont été attribuées à l'atelier du Palais à Aix-la-Chapelle<sup>117</sup>. Coupland s'appuie sur ce lien pour associer également les deniers de Louis le Pieux au buste et à la légende chrétienne à l'atelier du Palais<sup>118</sup>.



**Figure 85** - Exemple d'obole du Type 1 de Louis le Pieux frappée entre 814 et 818 (Prou 804 de Toulouse).

---

<sup>114</sup> (Coupland, 1990) p. 25.

<sup>115</sup> (Coupland, 1990) p. 26.

<sup>116</sup> Au détail près que la légende des deniers du Type 4 de Charlemagne est XPICTIANA RELIGIO et non XPISTIANA RELIGIO.

<sup>117</sup> (Grierson, 1967) p. 522.

<sup>118</sup> (Coupland, 1990) p. 25.

Des oboles, bien que très rares, peuvent être associées aux deniers du Type 1 de Louis le Pieux, et donc à la période 814-818. La similarité des types de droit et de revers de ces oboles avec les deniers au buste de Louis le Pieux les date sans aucun doute de la même période. Le droit de ces demi-deniers porte la titulature impériale en cercle autour du buste de l'empereur, tandis que le nom de l'atelier émetteur apparaît au revers autour d'une représentation symbolique de la ville. Outre la masse et le diamètre, la titulature impériale peut également différer pour les oboles (par exemple Prou 804 sur la Figure 85). Des oboles de Louis le Pieux au buste sont connues pour les ateliers d'Arles, Sens, Tours et probablement du Palais<sup>119</sup>. Un type d'obole au nom de Melle peut également être rattaché à la même période, bien que le buste de Louis le Pieux n'apparaisse pas sur ces monnaies<sup>120</sup>. La représentation de l'empereur y est remplacée par quatre triangles disposés pour former une croix. C'est le type de revers de ces pièces, qui comporte le nom de l'atelier émetteur en légende circulaire autour d'outils de monnayeurs qui permet de les rapprocher des deniers du Type 1 de Louis le Pieux : ce sont en effet les seuls pour ce souverain sur lesquels ce motif apparaît.

Coupland note pour le Type 1 de Louis le Pieux une augmentation de la production d'oboles qui selon lui pourrait indiquer qu'il y ait eu « *an increasing demand for smaller denomination coinage*<sup>121</sup> ». Cette remarque semble montrer que Coupland n'avait alors pas encore associé à Charlemagne certaines des oboles au monogramme carolin attribuées systématiquement à Charles le Chauve dans la littérature. A notre sens, les oboles sont rares pour les années 793/4-812 comme pour la période 814-818, et, dans les deux cas, cinq à dix ateliers situés pour la plupart dans le sud et l'ouest du territoire carolingien peuvent être recensés.

Une obole de Louis le Pieux d'un type particulier et d'un atelier indéterminé est décrite par Coupland. Elle combine le droit des pièces du Type 1 de cet empereur, portant le buste, avec le revers de celles du Type 2, sur lesquelles apparaît le nom de l'atelier de frappe dans le champ<sup>122</sup>. Coupland propose de dater l'émission des monnaies de ce type de l'année de transition entre les deux périodes, à savoir 818.

### ***b. Louis le Pieux Type 2 (818-822/3)***

Les deniers du Type 2 de Louis le Pieux sont datés de la période 818-822/3. Ils portent au droit la titulature impériale HLVDVVICVS IMP en cercle autour d'une croix, et au revers le nom de l'atelier émetteur dans le champ en une ou

---

<sup>119</sup> (Coupland, 1990) p. 26.

<sup>120</sup> (Coupland, 1990) p. 26 n. 16.

<sup>121</sup> (Coupland, 1990) p. 26.

<sup>122</sup> (Coupland, 1990) p. 27.



plusieurs lignes (Figure 86). Coupland estime que ces deniers ont été frappés jusqu'en 822 ou 823, mais que leur circulation peut s'être poursuivie jusqu'en 825<sup>123</sup>.



**Figure 86** - Exemple de denier du Type 2 de Louis le Pieux frappé entre 818 et 822/3 (Prou 8 du Palais à Aix-la-Chapelle).

L'existence de deux trésors de plusieurs centaines de monnaies composés quasi-exclusivement de deniers du Type 2 de Louis le Pieux permet une bonne connaissance du monnayage de cette période. La trouvaille d'Apremont-Veuillin (18) contenait 755 deniers carolingiens. Seuls deux ont été frappés en dehors de la période 818-822/3 : une monnaie de Melle au monogramme carolin vraisemblablement du Type 3 de Charlemagne, et un exemplaire de Louis le Pieux au buste (Type 1) de l'atelier de Pavie<sup>124</sup>. Le second trésor de monnaies du Type 2 de Louis le Pieux le plus important est celui de Belvézet (30). Celui-ci était composé d'un total de 293 pièces. Outre les deniers du Type 2 de Louis le Pieux, on retrouve parmi elles deux deniers au monogramme carolin attribuables à Charlemagne<sup>125</sup>, un denier du Type 1 de Louis le Pieux, ainsi qu'un denier et trois oboles du Type 3 de Louis le Pieux<sup>126</sup>.

Outre l'excellente homogénéité des types des monnaies qui traduit l'efficacité du renouvellement des pièces en circulation lors des changements de type, les deux trésors d'Apremont-Veuillin et Belvézet présentent trois similitudes remarquables.

Le nombre d'ateliers représentés et leur dispersion sur le territoire carolingien montrent dans les deux cas une circulation rapide des monnaies à travers l'ensemble de l'empire. Trente-cinq officines différentes sont représentées à

<sup>123</sup> (Coupland, 1988b) p. 433 et (Coupland, 1990) p. 28.

<sup>124</sup> (Bompois, 1871).

<sup>125</sup> Comme cela a été mentionné plus haut, les deniers de Melle au monogramme carolin peuvent être attribués à Charlemagne ou à Charles le Chauve. La présence d'un denier de Pavie au monogramme dans le trésor de Belvézet est un bon indice pour penser que la monnaie de Melle date de l'époque de Charlemagne : Pavie n'a en effet jamais fait partie du territoire de Charles le Chauve. Le denier de la trouvaille de Belvézet qui porte le nom de cette ville est donc sans discussion possible du Type 3 de Charlemagne (793/4-812), ce qui oriente l'attribution de la monnaie de Melle au monogramme de ce trésor à la même période.

<sup>126</sup> (de Saulcy, 1837).

Apremont-Veuillin et trente à Belv  zet ; les monnaies proviennent de l'ensemble des zones du territoire carolingien.

Les deux trouvailles regroupent de plus une proportion importante de monnaies issues d'ateliers relativement proches géographiquement. Cent-vingt-sept des pièces du trésor d'Apremont-Veuillin, dans le Cher, portent le nom de Bourges (17 % du total). A Belv  zet, situé dans le Gard, quarante monnaies proviennent de Marseille, auxquelles peuvent s'ajouter neuf exemplaires arl  siens pour former une « composante régionale » de 17 % du nombre total de pièces.

Enfin, l'importance des monnaies italiennes dans ces deux trésors est significative. Venise est l'atelier le plus représenté dans le trésor d'Apremont-Veuillin avec cent-quatre-vingt-quinze pièces. Si l'on ajoute les deniers de Pavie, Milan et Trévise, la composante italienne de cette trouvaille du Cher s'élève à 26 % du total. Pavie est le second atelier monétaire le plus important dans le trésor de Belv  zet avec quarante monnaies de cet atelier, auxquelles s'ajoute un des deux deniers du Type 3 de Charlemagne de cette trouvaille qui provient également de la capitale de l'ex-royaume lombard. Quatre-vingt-douze des deux-cent-quatre-vingt-treize monnaies de ce trésor proviennent d'Italie, soit 31 % de l'ensemble. La diffusion très large des monnaies italiennes du Type 2 de Louis le Pieux est confirmée par la découverte de telles pièces dans les fouilles de Dorestad<sup>127</sup>.

Le nombre d'ateliers monétaires ayant fonctionné pour l'émission des deniers du Type 2 de Louis le Pieux serait selon Coupland plus important que pour celle des pièces du Type 1<sup>128</sup>. Il convient toutefois de rester prudent quant à l'extrapolation du nombre d'officines ayant fonctionné pour chacune de ces deux périodes à partir des monnaies qui sont parvenues jusqu'à nous. Il est possible que le nombre d'ateliers émetteurs pour les Types 1 et 2 de Louis le Pieux soit proche, et que ce soit l'absence de trouvaille monétaire d'importance entre 814 et 818 qui explique le faible nombre d'ateliers recensés pour ces années.

La masse des deniers de 1,7 g est établie sous Charlemagne à partir de la réforme de 793/4 pour les monnaies au monogramme qui constituent son troisième type monétaire. La frappe de deniers correspondant à ce standard s'est poursuivie avec son quatrième type, puis Louis le Pieux s'y est également conformé pour les pièces de son premier type monétaire daté de 814-818. La possibilité d'une légère augmentation de la masse des deniers lors du passage du Type 1 au Type 2 de Louis le Pieux de 1,7 g    1,8 g a été discutée par le passé, et la question ne semble

---

<sup>127</sup> (Van Es et Verwers, 1980).

<sup>128</sup> (Coupland, 1990) p. 28.

pas véritablement tranchée. L'étude métrologique menée par Morrison abonde dans ce sens<sup>129</sup>. Grierson et Balckburn objectent que les deniers des trésors d'Apremont-Veuillin et Belvézet, qui constituent vraisemblablement la majeure partie des exemplaires contenus dans les collections, et qui peuvent donc être étudiés de ce point de vue, auraient été sélectionnés spécifiquement du fait de leur masse importante. Selon cette idée, la masse de ces deniers ne serait pas représentative du standard de l'ensemble des monnaies en circulation entre 818 et 822/3<sup>130</sup>. L'argumentation de Grierson et Blackburn est discutée de manière convaincante par Coupland qui soutient l'idée d'une légère augmentation du standard de la masse des deniers pour le Type 2 de Louis le Pieux<sup>131</sup>.

L'origine de quelques monnaies du Type 2 de Louis le Pieux ne peut pas être établie avec certitude. C'est le cas de deniers qui portent au revers les noms de *Alaboteshaim*, *Aldunheim* et *Stottenburg*, qui seraient situés en Allemagne actuelle sans qu'il soit possible de préciser davantage la localisation de chacun de ces lieux<sup>132</sup>.

Le denier de Melle conservé au Cabinet des Médailles sous la référence Prou 720 ne correspond pas à la description qui en est faite dans le catalogue de Maurice Prou : dans cet ouvrage, la légende relevée pour le revers est en deux lignes ; la monnaie contenue dans le médaillier carolingien de la collection nationale française présente bien une légende circulaire comme cela apparaît dans notre catalogue.

Les deniers similaires à Prou 720 peuvent être attribués au Type 2 de Louis le Pieux bien que la légende de leur revers ne soit pas linéaire : l'absence de buste au droit et d'outils de monnayeurs au revers exclut la possibilité de l'attribuer au Type 1 ; la mention de l'atelier émetteur est de plus incompatible avec le Type 3. Il s'agit donc très certainement de deniers du Type 2 de Louis le Pieux frappé entre 818 et 822/3, et dont la légende au revers présente la particularité d'être circulaire et non linéaire. La présence de deux de ces exemplaires mellois dans le trésor d'Apremont-Veuillin confirme l'attribution à cette période. Des deniers toulousains présentant cette particularité existent également. Coupland émet l'hypothèse d'une frappe de ces monnaies peu avant 840, à la fin du règne de Louis le Pieux<sup>133</sup>. Cela signifierait que ces pièces ne seraient pas datées des années d'émission du Type 2

---

<sup>129</sup> (Morrison, 1963) p. 422.

<sup>130</sup> MEC p. 215-216.

<sup>131</sup> (Coupland, 1988b) p. 433 et (Coupland, 1990) p. 29.

<sup>132</sup> (Coupland, 1990) p. 28.

<sup>133</sup> (Coupland, 1991) p. 141.

de cet empereur (818-822/3) mais de celles du Type 3 (822/3-840). Il s'appuie sur la similarité de la disposition des légendes de ces monnaies que l'on retrouverait sur certaines pièces de Charles le Chauve, qui leur seraient directement consécutives<sup>134</sup>.

Le Type 2 de Louis le Pieux est le premier depuis le début des émissions monétaires carolingiennes pour lequel apparaissent à la fois une diversité d'ateliers émetteurs et une proportion d'oboles significatives<sup>135</sup>.



**Figure 87** - Exemple d'obole du Type 2 de Louis le Pieux à la légende bi-linéaire au revers frappée entre 818 et 822/3 (Prou 838 de Narbonne).



**Figure 88** - Exemple d'obole du Type 2 de Louis le Pieux à la légende bi-linéaire au droit frappée entre 818 et 822 (Prou 186 de Quentovic).

Deux types d'oboles semblent avoir coexisté avec les deniers du Type 2 de Louis le Pieux entre 818 et 822/3. Les premières reprennent le type général des deniers contemporains : la titulature impériale apparaît en cercle autour d'une croix, et le revers porte le nom de l'atelier de frappe dans le champ (Figure 87). C'est le cas pour les demi-deniers aux noms d'Arles, Cologne, Dax, Narbonne, Pavie, Sens et Toulouse. Pour les autres, la disposition des légendes de droit et de revers est inversée par rapport à celle des deniers de la même période : le nom de l'empereur apparaît dans le champ en deux lignes au droit (LVDO/VVIC), et le revers porte la mention de l'atelier émetteur en légende circulaire autour d'une croix (Figure 88). De telles oboles sont connues pour Bourges, Meaux, Nantes, Quentovic, Reims, Rouen et Tours. Les deux types différents existent pour les demi-deniers issus des ateliers de Melle et d'« Aquitaine ». Coupland remarque que l'existence des deux types d'oboles identifiées pour la période 818-822/3 à Melle et pour l'atelier ayant frappé au nom d'« Aquitaine » pourrait suggérer que les monnaies qui portent cette dernière légende pourraient être issues de l'atelier de

<sup>134</sup> (Coupland, 1991) p. 141.

<sup>135</sup> On notera cependant qu'aucune obole de ce type n'est recensée pour les deux principaux trésors de cette période d'Apremont-Veuillin et Belvézet.

Melle<sup>136</sup>. Quelques oboles présentent enfin une troisième variante avec les deux légendes de droit et de revers en cercle autour d'une croix. De tels exemplaires sont connus pour Melle, Bourges et au nom d'« Aquitaine ».

Coupland identifie quinze ateliers différents ayant émis des oboles au nom de Louis le Pieux entre 818 et 822/3<sup>137</sup>. Les émissions d'oboles sont localisées sous Charlemagne en Aquitaine pour la grande majorité de celles qu'il nous est permis d'étudier actuellement. Le caractère aquitain de l'origine des oboles semble se poursuivre pour les pièces du Type 1 de Louis le Pieux entre 814 et 818. Pour le Type 2, des ateliers situés dans différentes zones de l'empire sont connus. Cela peut être interprété comme une tentative de l'empereur de rendre plus accessibles les oboles dans l'ensemble du territoire carolingien, cette espèce étant plus adaptée aux transactions de faible valeur, et donc de développer l'usage de la monnaie comme moyen de transaction<sup>138</sup>.

### *c. Louis le Pieux Type 3 (822/3-840)*

Les monnaies du Type 3 de Louis le Pieux ont été frappées entre 822/3 et la mort de l'empereur en 840. Au contraire de la plupart des monnaies antérieures de ce même souverain ou des précédents Carolingiens, ces pièces ne portent pas la mention de l'atelier émetteur sur leur revers. Cela a été interprété comme un signe d'affirmation de l'autorité impériale<sup>139</sup>.

Le droit des monnaies du Type 3 de Louis le Pieux poursuit le type de celles de la période précédente, avec la titulature impériale *HLVDOVICVS IMP* en légende circulaire autour d'une croix. Le revers évolue : il porte la légende *XPISTIANA RELIGIO* (« religion chrétienne ») en cercle autour d'un temple tétrastyle (Figure 89). Ces deniers peuvent être appelés dans la littérature « deniers au temple » ou « deniers à la légende chrétienne ».



**Figure 89** - Exemple de denier du Type 3 de Louis le Pieux frappé entre 822/3 et 840 (Prou 1027 attribuable à Orléans).

<sup>136</sup> (Coupland, 1990) p. 33 n. 35.

<sup>137</sup> (Coupland, 1990) p. 28.

<sup>138</sup> (Coupland, 1990) p. 29.

<sup>139</sup> MEC p. 216.

Les monnaies du Type 3 de Louis le Pieux sont les plus abondantes dans les trouvailles monétaires de la période carolingienne jusqu'en 864. Les trois trésors principaux de ces deniers au temple sont ceux de Pilligerheck (Rhénanie-Palatinat, Allemagne), Roermond (Limbourg, Pays-Bas) et Fontaines (71) qui contenaient chacun plus de cinq cents de ces pièces, ainsi que des exemplaires de Pépin II d'Aquitaine, Charles le Chauve, Lothaire et Louis le Germanique. L'abondance des trouvailles de monnaies au temple de Louis le Pieux peut s'expliquer par la durée de la période de frappe de ce type de dix-huit ans, alors que les deux types précédents de Louis le Pieux n'ont été émis que durant une période de quatre ans environ. L'étude des trésors monétaires contenant des monnaies du Type 3 de Louis le Pieux semble de plus montrer que leur circulation s'est poursuivie concurremment à celle des pièces de ses fils durant plusieurs années après sa mort en 840<sup>140</sup>.

L'absence de mention de l'atelier de frappe sur les pièces du Type 3 de Louis le Pieux ne permet pas de tracer l'origine de celles contenues dans les trésors, et donc d'évaluer la mobilité des exemplaires frappés dans différentes régions sur l'ensemble du territoire carolingien.

Un classement basé sur des critères stylistiques a été proposé par Coupland afin d'attribuer certaines des monnaies du Type 3 de Louis le Pieux à des ateliers monétaires. La variété de forme des temples représentés sur les revers, le dessin des lettres ainsi que la présence de globules dans les cantons de la croix centrale au droit, constituent les principaux critères de classement avancés par ce numismate. Des deniers ont ainsi été regroupés et attribués aux ateliers de Quentovic, Dorestad, Maastricht, Trèves, Orléans, Milan, Venise et Verdun<sup>141</sup>. Grierson et Blackburn mentionnent Pavie parmi les ateliers émetteurs de monnaies du Type 3 de Louis le Pieux<sup>142</sup>, qui n'est pas cité par Coupland. Les attributions proposées dans notre catalogue pour les pièces étudiées sont basées sur le classement de Coupland. Grierson et Blackburn avancent que les monnaies du Type 3 de Louis le Pieux ont été frappées dans un grand nombre de lieux différents<sup>143</sup>. Coupland suggère quant à lui qu'il y a tout lieu de croire que les ateliers monétaires actifs pour l'émission des monnaies du Type 2 de Louis le Pieux et pour celle de ses successeurs après 840 ont maintenu une activité entre 822/3 et 840<sup>144</sup>.

---

<sup>140</sup> (Coupland, 1990) p. 36.

<sup>141</sup> (Coupland, 1990) p. 40 à 45.

<sup>142</sup> MEC p. 217.

<sup>143</sup> « ...minted in so many localities » dans MEC p. 216.

<sup>144</sup> (Coupland, 1990) p. 39.

Coupland mentionne des deniers de Louis le Pieux similaires à ceux du Type 3 au temple, à la différence près que la légende chrétienne au revers est remplacée par le nom de l'atelier émetteur. De tels exemplaires sont connus pour Dorestad (MG 337) et Maastricht seulement<sup>145</sup>. Ces monnaies particulièrement rares auraient été frappées en 839 ou 840 seulement, et ne constituent pas un type monétaire à part entière.



**Figure 90** - Exemple d'obole du Type 3 de Louis le Pieux frappé entre 822/3 et 840 (Prou 1023). D'après Prou.

Des oboles au temple et à la légende chrétienne, et donc liées aux deniers du Type 3 de Louis le Pieux, ont également été émises entre 822/3 et 840 (Figure 90). Ces pièces portent comme les deniers la titulature impériale *HLVDOVVICVS IMP* en cercle autour d'une croix au droit, et la légende chrétienne *XPISTIANA RELIGIO* en cercle autour d'un temple au revers. Seuls les distinguent la masse et le module. Les trésors de cette période semblent montrer que la masse monétaire en circulation reste très majoritairement constituée de deniers et que les oboles sont peu fréquentes, comme cela était déjà le cas pour les types monétaires antérieurs.

Il est possible que certaines des oboles frappées durant la période d'émission du Type 3 de Louis le Pieux ne reprennent pas le type de revers au temple et à la légende chrétienne des deniers contemporains. C'est du moins une hypothèse proposée par Coupland, qui constate que le trésor de Roermond contenait, outre sept cent vingt-cinq deniers et neuf oboles au temple de la période 822/3-840, huit oboles et seulement deux deniers au nom d'atelier dans le champ<sup>146</sup>.

## **7. Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine (817-838)**

Le royaume d'Aquitaine tel qu'il est délimité à la période carolingienne correspond à une zone qui s'étend de la Loire jusqu'aux Pyrénées, et de l'Atlantique à la vallée du Rhône. Après avoir été porté par Louis le Pieux durant le règne de Charlemagne à partir de 781, son second fils Pépin prend le titre de roi d'Aquitaine en 817.

La différenciation des monnaies de Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine de celles de son successeur Pépin II a longtemps fait débat parmi les numismates. Grierson a estimé

<sup>145</sup> (Coupland, 1988a) p. 14 et MEC p. 217.

<sup>146</sup> (Coupland, 1990) p. 35.

qu'aucune des pièces au nom de Pépin d'Aquitaine n'a été frappée du vivant de Louis le Pieux<sup>147</sup>. Cela signifierait que tous les exemplaires de ce type doivent être attribués à Pépin II. Coupland réfute cette idée et propose d'attribuer l'un des types concernés au premier des deux souverains carolingiens susceptibles d'être à l'origine de leur frappe : les deniers au portrait au droit et au temple au revers, tels que Prou 665, seraient selon lui de Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine<sup>148</sup> (Figure 91).



**Figure 91** - Exemple de denier de Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine frappé entre 817 et 838 (Prou 665 au nom d'Aquitaine).

L'émission des monnaies de Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine aurait été de très faible durée et ampleur si l'on en croit Coupland : il s'agirait de pièces frappées pour commémorer son accession au trône d'Aquitaine en 817, qui auraient été rapidement remplacées lors du changement de type monétaire particulièrement efficace de 818<sup>149</sup>. La liaison de coin de droit qui existe entre cinq des six monnaies connues pour Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine appuie l'hypothèse d'une émission de très faible ampleur<sup>150</sup>.

## 8. Pépin II d'Aquitaine (839-852)

La problématique de l'attribution des monnaies au nom de Pépin d'Aquitaine à l'un des deux souverains susceptibles d'en être à l'origine a été évoquée dans le paragraphe précédent. Les pièces attribuables à Pépin II d'Aquitaine seraient donc toutes celles qui portent le nom de Pépin roi, à l'exception de celles au buste et au temple, si l'on en croit Coupland.

Le classement de Grierson et Blackburn des monnaies de Pépin II d'Aquitaine est basé sur leur typologie locale<sup>151</sup>. Ces auteurs ne proposent pas de chronologie d'évolution globale des types monétaires. Des monnaies au buste sont recensées pour Bourges<sup>152</sup> ; des exemplaires au monogramme pippinide sont

<sup>147</sup> MEC p. 218.

<sup>148</sup> Grierson et Blackburn proposent une attribution à Pépin II d'Aquitaine et une frappe en 840 et 841 pour ces exemplaires. Voir MEC p. 219.

<sup>149</sup> (Coupland, 1989) p. 199.

<sup>150</sup> (Coupland, 1989) p. 199.

<sup>151</sup> MEC p. 219.

<sup>152</sup> Seuls les deniers de Bourges que ces auteurs attribuent à Pépin II et à l'année 840 ou 841 seraient de ce souverain selon Coupland. Ceux au nom d'Aquitaine seraient plus probablement de Pépin I<sup>er</sup>



rapportés pour les ateliers de Melle, Poitiers (Figure 92) et Toulouse ; des pièces sur lesquelles apparaît un temple au revers et une légende du type XPISTIANA RELIGIO, ou les noms de Dax ou d'Aquitaine ; des oboles de Cahors et d'Aquitaine (Figure 93) portent le nom d'atelier dans le champ en deux ou trois lignes au revers ; enfin, la titulature royale et le lieu d'émission sont inscrits autour d'une croix au droit comme au revers sur les monnaies de Limoges (Figure 94).



**Figure 92** - Exemple de denier au monogramme de Pépin II d'Aquitaine frappé entre 839 et 852 (Prou 677 de Poitiers).



**Figure 93** - Exemple d'obole au nom d'atelier dans le champ de Pépin II d'Aquitaine frappé entre 839 et 852 (Prou 652 au nom d'Aquitaine).



**Figure 94** - Exemple d'obole à la croix au droit et au revers de Pépin II d'Aquitaine frappé entre 839 et 852 (Prou 776 de Limoges).

Les conflits entre Pépin II et Charles le Chauve pour le contrôle du royaume d'Aquitaine ont marqué la majeure partie des années 840. Ils doivent être pris en compte pour définir les années des émissions monétaires de Pépin II d'Aquitaine pour chaque atelier.

Grierson et Blackburn proposent de situer le début de la frappe de monnaies par Pépin II d'Aquitaine en 845, suite au traité de Saint-Benoît-sur-Loire conclu avec Charles le Chauve<sup>153</sup>. Cet accord stipule que Pépin reçoit la majeure partie du royaume d'Aquitaine à l'exception des zones les plus septentrionales, et s'engage à rester fidèle à son oncle<sup>154</sup>. Ces émissions auraient perduré pour la plupart des ateliers jusqu'en 848 quand Charles le Chauve se fait couronner roi d'Aquitaine,

---

selon ce dernier auteur ; voir (Coupland, 1989) p. 197-198 et *supra* n. 148. Les deniers de Bourges concernés ne sont pas ceux du type de Prou 735 qui doivent être attribués à Charles le Chauve, bien que cet exemplaire précis soit un faux d'après notre analyse, d'après (Coupland, 1989) p. 211.

<sup>153</sup> MEC p. 218-219.

<sup>154</sup> (Riché, 1983) p. 215.

voire jusqu'en 849 pour Toulouse qui reste sous le contrôle de Pépin II. Les pièces dont le lieu d'émission est « Aquitaine » pourraient avoir été frappées jusqu'en 852 selon Grierson et Blackburn<sup>155</sup>. C'est en cette année 852, qui est retenue habituellement pour marquer la fin de son règne, que Pépin II d'Aquitaine est fait prisonnier par son oncle ; Il ne tarde pas à s'échapper et « *continuera à errer et à conspirer jusqu'à sa mort en 864.* »<sup>156</sup>.

Coupland propose les mêmes années d'émission pour Pépin II d'Aquitaine que Grierson et Blackburn, à partir de l'étude des évènements politiques et militaires des années de son règne<sup>157</sup>. La majeure partie des monnaies de ce souverain a donc vraisemblablement été frappée entre 845 et 848, et peut-être quelque temps auparavant et après pour Toulouse<sup>158</sup>.

Coupland attribue sur la base de critères stylistiques les monnaies de Pépin II d'Aquitaine qui portent comme mention de lieu d'émission AQUITANIORVM à l'atelier de Bordeaux, et les oboles à la légende AQVI/TANIA à Bourges pour l'essentiel<sup>159</sup>. Ce même chercheur propose d'attribuer certains exemplaires au temple et à la légende chrétienne sans mention d'atelier à Melle, Dax et Bordeaux<sup>160</sup>.

Le royaume d'Aquitaine se distingue du reste du territoire carolingien, d'une manière générale, par une production d'oboles qui semble plus importante qu'ailleurs. Cette spécificité régionale qui a été observée pour les différents types monétaires de Charlemagne et Louis le Pieux est particulièrement marquée pour le monnayage de Pépin II d'Aquitaine : des oboles sont connues pour tous les ateliers ayant frappé au nom de ce souverain à l'exception de Poitiers, et cette espèce semble représenter une fraction importante de l'ensemble du numéraire en circulation<sup>161</sup>. Cela constitue une évolution notable par rapport à ce qui peut être observé pour les règnes précédents. Les trésors de ce souverain laissent de plus apparaître une régionalisation de la circulation monétaire par rapport à Charlemagne et Louis le Pieux<sup>162</sup>.

---

<sup>155</sup> MEC p. 219.

<sup>156</sup> (Riché, 1983) p. 216.

<sup>157</sup> Ces évènements sont présentés dans (Coupland, 1989) p. 199 et suivantes.

<sup>158</sup> (Coupland, 1989) p. 203.

<sup>159</sup> (Coupland, 1989) p. 203.

<sup>160</sup> (Coupland, 1989) p. 209-210.

<sup>161</sup> (Coupland, 1989) p. 216.

<sup>162</sup> (Coupland, 1989) p. 217.

## 9. Lothaire (840-855)

Les frappes monétaires de Lothaire en Francie Médiante présentent des types divers qui ne semblent pas correspondre à un découpage chronologique précis qui serait valable pour l'ensemble des ateliers du territoire.

Trois types monétaires principaux au nom de Lothaire peuvent être distingués. Le premier porte au droit un buste autour duquel est inscrite une titulature impériale du type HLOTARIVS IMP AVG, et au revers un temple entouré d'une légende chrétienne (Figure 95). Sur le second, on trouve au droit une croix centrale cerclée de la titulature impériale, et au revers un temple au centre de la légende XPISTIANA RELIGIO ou du nom de l'atelier émetteur (Figure 96). Le droit du troisième type est identique à celui du second, avec une croix centrale, mais le revers de ces monnaies porte le nom de l'atelier dans le champ ou une ou plusieurs lignes (Figure 97).



**Figure 95** - Exemple de denier au buste et au temple de Lothaire frappé entre 840 et 855 (Prou 1050 attribuable à Pavie selon Coupland).



**Figure 96** - Exemple de denier à la croix et au temple de Lothaire frappé entre 840 et 855 (Prou 11 du Palais à Aix-la-Chapelle).



**Figure 97** - Exemple de denier au nom d'atelier dans le champ de Lothaire frappé entre 840 et 855 (Prou 910 de Milan).

Treize ateliers ayant émis des monnaies de Lothaire à leur nom sont connus d'après MEC<sup>163</sup>. La liste établie par Coupland en regroupe dix-sept<sup>164</sup>. Dorestad

---

<sup>163</sup> MEC p. 223.

semble avoir été l'atelier monétaire le plus prolifique si l'on considère les pièces qui sont parvenues jusqu'à notre époque<sup>165</sup>.

Les titulatures impériales qui apparaissent sur le droit des monnaies de Lothaire ne sont pas aussi uniformes que celles des deniers antérieurs de Louis le Pieux. En particulier pour Dorestad, des variantes du type IOTAMVS IMP AT existent.

La dégénérescence de ces légendes combinée à la faible habileté d'exécution des coins utilisés pour la frappe des exemplaires concernés a conduit des numismates à qualifier certaines de ces pièces d'imitations frisonnes (MEC 1.820=Prou 73 avec certitude pour Grierson, MEC 1.818=Prou 74 avec un doute). Ces monnaies n'auraient pas été frappées à Dorestad même mais ailleurs, en Frise ou en Scandinavie. Leur période d'émission pourrait en outre être plus tardive que celle du règne de Lothaire ; l'histoire de Dorestad durant ces années justifierait cette hypothèse<sup>166</sup>. Coupland conteste l'idée de la frappe d'imitations frisonnes au nom de Dorestad, et démontre que les prétendues imitations auraient selon toute vraisemblance été fabriquées sous l'autorité de Lothaire et dans cette cité<sup>167</sup>.

Lothaire a régné sur une partie de la Bourgogne et sur la Provence, mais aucune monnaie au nom des ateliers de Besançon, Lyon, Vienne, Arles ou Marseille n'est connue<sup>168</sup>. Les pièces de cet empereur qui portent un nom d'atelier proviennent pour l'essentiel d'une première région qui s'étend des hautes vallées de la Meuse et de la Moselle jusqu'en Frise d'une part, et d'une seconde qui correspond à Italie du nord d'autre part<sup>169</sup>. Les deux types monétaires de Lothaire au temple et au nom d'atelier dans le champ sont connus dans la première région définie, parfois pour un même atelier, tandis que ce dernier type est le seul pour lequel des monnaies existent avec certitude pour l'Italie du nord. Dans cette région, les légendes de droit sont en outre plus normalisées que dans le nord du territoire de Francie Médiante.

---

<sup>164</sup> (Coupland, 2001).

<sup>165</sup> Coupland rapporte que le trésor de Tzummarum II contenait 2606 pièces de Dorestad sur un total de 2789. Voir (Coupland, 2001) p. 173. Le détail de cette trouvaille n'a pas été publié.

<sup>166</sup> MEC p. 223. Voir également (Van Gelder, 1961).

<sup>167</sup> (Coupland, 2001) p. 174.

<sup>168</sup> MEC p. 224.

<sup>169</sup> Voir la carte des ateliers émetteurs de monnaies de Lothaire présentée par Coupland. (Coupland, 2001) p. 169.

L'étude de l'histoire politique et militaire de l'ex-empire de Louis le Pieux, ainsi que l'étude numismatique des pièces, a servi de support à Coupland pour proposer une typologie et une chronologie des émissions monétaires de Lothaire dont nous reprenons ici les grandes lignes<sup>170</sup>.

Les monnaies de Lothaire au buste ne seraient pas datées des années de son règne sur la Francie Médiante, soit de 840 à 855<sup>171</sup>. Il s'agirait de pièces frappées du vivant de son père Louis le Pieux, en 823, pour célébrer le couronnement de Lothaire en tant que roi d'Italie, ou durant la révolte des années 833-834. Grierson et Blackburn ont soutenu la seconde hypothèse<sup>172</sup>, tandis que Coupland a argumenté en faveur de la première<sup>173</sup>. La corrélation entre les événements politiques et les types et légendes des frappes monétaires de Louis le Pieux, Lothaire et Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine supporte l'hypothèse de Coupland.

Coupland distingue cinq types stylistiques différents parmi les vingt-neuf monnaies au buste de Lothaire qu'il a recensées<sup>174</sup>. Parmi ces cinq types, le numismate britannique propose d'en associer quatre aux ateliers du Palais, de Milan, de Metz et de Pavie. Le groupe de monnaies associées à l'atelier monétaire du Palais à Aix-la-Chapelle serait le plus largement représenté, avec dix-huit des vingt-neuf exemplaires connus. Viendraient ensuite Metz avec cinq pièces, puis Milan avec quatre, et enfin Pavie et le cinquième atelier non localisé avec une monnaie pour chaque.

La présence de deux ateliers italiens dans la liste de Coupland signifierait que les monnaies au nom d'atelier dans le champ au revers n'ont pas été les seules émissions de Lothaire dans cette partie de son territoire. Il ne s'agirait toutefois pas, d'après cette hypothèse, d'émissions de la période du règne de Lothaire sur la Francie Médiante entre 840 et 855.

La chronologie des émissions de Lothaire proposée par Coupland attribue un second type aux années de règne de Louis le Pieux (814-840). Il s'agit des monnaies avec le revers au temple et à la légende chrétienne, sur lesquelles la titulature de Lothaire, inscrite autour d'une croix au droit, est du type « HLOTHARIVS AGVS »<sup>175</sup>. Coupland distingue les pièces sur lesquelles cette légende apparaît au droit des autres monnaies à la croix, au temple et à la légende chrétienne, plus courantes, dont la titulature est HLOTHARIVS IMP. Ces dernières

---

<sup>170</sup> D'après (Coupland, 2001).

<sup>171</sup> (Coupland, 1988b) p. 45-48 et (Coupland, 2001) p. 161-164.

<sup>172</sup> MEC p. 223.

<sup>173</sup> (Coupland, 1990) p. 47 et (Coupland, 2001) p. 161-164.

<sup>174</sup> (Coupland, 2001) p. 160-164.

<sup>175</sup> (Coupland, 2001) p. 163-164.

pièces auraient été frappées durant les années du règne de Lothaire sur la Francie Médiante.

Les monnaies qui auraient été émises au nom de Lothaire immédiatement après la mort de son père en 840 seraient, selon Coupland, celles avec un temple entouré par le nom de l'atelier de frappe au revers, ou à la légende chrétienne à la place de la mention du lieu d'émission<sup>176</sup>. Il propose, de plus, une classification des pièces de ce type sans nom d'atelier et attribue la plupart d'entre elles à des villes : Cambrai, Metz, Venise, le Palais, Maastricht, Dorestad, Huy, Verdun et Lyon, avec une incertitude pour les trois dernières<sup>177</sup>. Un groupe stylistique correspond à un atelier indéterminé qui pourrait être Dinant, Maubeuge ou Namur, et un dernier pourrait être le produit de l'activité d'un atelier frison non-officiel<sup>178</sup>.

Les pièces dont le revers porte le nom de l'atelier émetteur dans le champ auraient été émises à partir de 850 et jusqu'à la mort de Lothaire en 855, si les hypothèses de Coupland sont justes.

La production des trois principaux types monétaires au nom de Lothaire ne semble toutefois pas correspondre à un découpage chronologique selon Grierson et Blackburn<sup>179</sup>.

Les classements chronologique et typologique de Coupland n'ont pas été retenus pour apparaître dans le catalogue des monnaies étudiées dans le cadre de cette thèse. Ces attributions sont toutefois examinées lors de l'interprétation historique des résultats.

L'Italie se distingue du reste du territoire de Lothaire du point de vue de la numismatique : seules des pièces au nom d'atelier dans le champ sont en effet connues pour les officines italiennes – si l'on exclut les deniers au buste attribués par Coupland à Milan et Pavie et dont la période de frappe serait antérieure à 840. Ce numismate écarte l'hypothèse selon laquelle les ateliers d'Italie auraient seulement commencé à émettre des monnaies au nom de Lothaire à partir de 850, année qui marque, selon lui, la transition du type à la croix et au temple à celui au nom d'atelier dans le champ. Il serait pour lui plus probable que les ateliers de Milan, Pavie, Trévise et Venise aient repris dès 840 le type de revers des monnaies du Type 2 de Louis le Pieux frappé entre 818 et 822/3. Le revers des deniers italiens de Lothaire connaît toutefois une évolution par rapport à celui des pièces du Type 2 de Louis le Pieux, qui constituent le monnayage antérieur le plus récent qui fasse apparaître la mention du lieu d'émission : le nom de l'atelier n'apparaît en

---

<sup>176</sup> (Coupland, 2001) p. 165-166.

<sup>177</sup> (Coupland, 2001) p. 184-191.

<sup>178</sup> (Coupland, 2001) p. 190-191.

<sup>179</sup> MEC p. 223.

effet plus en deux lignes mais en une. MEDIOL<sup>\</sup>, forme abrégée de MEDIOLANVM, peut être lu sur les monnaies de Milan (Prou 910). Pour Pavie, la légende PAPIA en une ligne que l'on trouve sur les monnaies du Type 2 de Louis le Pieux a été « reconduite » par Lothaire (Prou 904).

La publication de Coupland dédiée au monnayage de Lothaire contient une étude métrologique qui porte sur plus de cinq cents pièces<sup>180</sup>. Les conclusions de ses travaux rejoignent celles de Morrison, qui avait avancé l'idée d'un léger déclin de la masse des deniers sous Lothaire par rapport à ceux des types antérieurs<sup>181</sup>. Le standard de masse semble se situer pour les monnaies de Lothaire autour de 1,5 g, au lieu des 1,7 g des deniers taillés à 1/240 de la livre de Charlemagne. Les pièces de Dorestad présentent toutefois des masses plus élevées de 0,1 g environ d'après l'histogramme de répartition présenté par Coupland<sup>182</sup>.

Des monnaies qui portent la titulature impériale de Lothaire ont été frappées aux noms de Bordeaux, de Tours et d'Aquitaine, alors que ces villes ou région ne font pas partie du territoire de Francie Médiante ou Lotharingie<sup>183</sup>. Grierson et Blackburn supposent que ces émissions ont résulté de l'idée des monnayeurs des ateliers concernés selon laquelle la frappe ne devait pas se faire au nom des « rois sous la domination de l'empereur » (« *imperial kings* »), mais au nom du seul dépositaire du titre d'empereur<sup>184</sup>. Pour Lafaurie, les pièces de Lothaire qui portent des noms d'ateliers situés en Aquitaine auraient été frappées entre 840 et 843, c'est-à-dire durant les années de trouble entre la mort de Louis le Pieux et la signature du traité de Verdun entre ses trois héritiers survivants<sup>185</sup>. Coupland appuie Lafaurie pour la période d'émission de ces monnaies, et ajoute que celles au nom d'Aquitaine auraient été frappées à l'atelier de Bordeaux par son allié Pépin II d'Aquitaine<sup>186</sup>. L'explication d'une frappe au nom de Lothaire à Tours semble plus délicate pour Coupland : le comte de Tours était un fidèle de Charles le Chauve. La seule période durant laquelle Lothaire a dominé cette ville, et qui permettrait de dater les émissions de Lothaire au nom de Tours, est l'hiver 841. Ou bien faut-il

---

<sup>180</sup> (Coupland, 2001) p. 168.

<sup>181</sup> (Morrison, 1963) p. 419 et graphique p. 422.

<sup>182</sup> (Coupland, 2001) p. 167.

<sup>183</sup> Un cinquième atelier de frappe qui aurait émis des monnaies au nom de Lothaire en dehors des frontières de son territoire a été cité (MEC p. 224). Ces monnaies sur lesquelles Grierson et Blackburn ont lu le nom de Troyes seraient en réalité de Maastricht. MG 535-540 et (Coupland, 2001) p. 168 n. 43.

<sup>184</sup> MEC p. 224.

<sup>185</sup> (Lafaurie, 1983) p. 141.

<sup>186</sup> (Coupland, 2001) p. 168 et (Coupland, 1989) p. 203.

envisager la révolte de 833 comme période d'émission des monnaies de Tours au nom de Lothaire<sup>187</sup>.

Quelles que soient les raisons qui expliquent l'émission de monnaies au nom de Lothaire en dehors de son territoire de Francie Médiane, tout indique que son ampleur a été très faible.

## **10. Charles le Chauve (840-877)**

La frappe des monnaies au nom de Charles le Chauve peut se diviser en deux périodes dont l'édit de Pîtres de 864 constitue la charnière. La diversité des monnayages frappés avant cette date, la poursuite de l'émission de monnaies qui ne correspondent pas à l'édit de Pîtres après 864, ainsi que les difficultés à comprendre la cohérence entre ce texte et la réalité de la circulation monétaire de l'époque telle qu'elle apparaît d'après les trésors, compliquent l'étude des monnaies de Charles le Chauve. Des exemplaires à la titulature impériale ont également été frappés par ce souverain à l'extrême fin de son règne.

### ***a. Charles le Chauve Première période (840-864)***

A l'instar des émissions de son frère Lothaire en Francie Médiane, les différents types monétaires émis au nom de Charles le Chauve entre 840 et 864 ne correspondent pas à une évolution temporelle uniforme, comme cela peut être observé pour les règnes de Charlemagne et Louis le Pieux<sup>188</sup>. Des particularités régionales et locales apparaissent ; des variétés de types pour un même atelier existent, pour lesquelles la définition d'une chronologie est malaisée. Des monnaies qui ne présentent d'autre point commun que les standards de masse et de module, ainsi que le nom de Charles, ont été émises dans le royaume de Francie Occidentale durant les mêmes années. La diversité des types monétaires est attribuée à la perte du contrôle royal sur les ateliers monétaires<sup>189</sup>.

Les monnaies de Charles le Chauve antérieures à l'édit de Pîtres de 864 n'ont pas bénéficié d'un attrait suite à la découverte d'importants trésors, comme ce fut le cas au XIX<sup>e</sup> siècle pour les émissions postérieures<sup>190</sup>. Les principales trouvailles contenant des pièces de la période 840-864 que sont Pilligerheck

---

<sup>187</sup> (Coupland, 2001) p. 170.

<sup>188</sup> La frappe des monnaies des types présentés sous l'appellation « Charles le Chauve Première période (840-864) » s'est poursuivie pour les deniers au monogramme de certains ateliers sous ce même souverain après 864, voire après sa mort pour les monnaies aux types dits « immobilisés ». Les bornes définies ici doivent être considérées comme une période de début d'émission pour les monnaies au monogramme carolin.

<sup>189</sup> (Coupland, 1991) p. 153.

<sup>190</sup> (Coupland, 1991) p. 121.



(Rhénanie-Palatinat, Allemagne) et Roermond (Limbourg, Pays-Bas) n'ont été découvertes que plus récemment<sup>191</sup>. L'absence de la mention de l'atelier émetteur sur nombre d'entre elles, ainsi que la complexité de leur chronologie, ont également contribué à ce que les monnaies de Charles le Chauve frappées avant 864 ne fassent pas l'objet d'une étude approfondie<sup>192</sup>.

Grierson et Blackburn distinguent cinq types monétaires différents frappés au nom de Charles le Chauve avant 864, qui correspondent à des particularismes locaux dans son royaume<sup>193</sup>.

Le premier porte au droit une croix entourée de la titulature royale CARLVVS REX, et au revers le nom de l'atelier dans le champ, en deux lignes dans la suite, Figure 98). Les ateliers ayant émis des monnaies de ce type sont situés principalement en région parisienne, mais également en Aquitaine et à Barcelone. Des oboles correspondant à ces deniers sont connues. Grierson et Blackburn datent l'émission de ce type monétaire de Charles le Chauve des années 840<sup>194</sup>.



**Figure 98** - Exemple de denier de Charles le Chauve du type au nom d'atelier dans le champ (MEC 1a) frappé entre 840 et 864 (Prou 321 de Paris).

Le second type monétaire de Charles le Chauve présenté dans MEC pour la période 840-864 est celui au buste (MEC 1b, Figure 99). La représentation du souverain apparaît au centre de la titulature royale de Charles le Chauve au droit des monnaies, tandis que leur revers porte le nom de l'atelier émetteur dans le champ. On notera que la titulature royale a évolué par rapport à la dernière émission de grande ampleur d'un souverain carolingien du nom de Charles : pour le type MEC 1b comme pour le type MEC 1a de Charles le Chauve, elle apparaît sous la forme CARLVVS REX. C'était en revanche CARLVVS REX FR qui était inscrit de manière systématique sur les monnaies de Charlemagne au monogramme émises entre 793/4 et 812.

<sup>191</sup> Voir (Lafaurie, 1969-70) pour Pilligerheck et (Van Gelder, 1985) pour Roermond.

<sup>192</sup> (Coupland, 1991) p. 122.

<sup>193</sup> MEC p. 231-232.

<sup>194</sup> MEC p. 231.

Seules des monnaies de Bourges sont connues pour le type MEC 1b de Charles le Chauve avec le buste au droit. Elles seraient datées des années 840-841, et auraient précédé les pièces du type MEC 1a présenté dans le paragraphe précédent pour l'atelier monétaire de Bourges<sup>195</sup>.



**Figure 99** - Exemple de denier de Charles le Chauve du type au buste (MEC 1b) frappé entre 840 et 864 (Prou 735 de Bourges).

Grierson et Blackburn décrivent un troisième type monétaire antérieur à l'édit de Pîtres pour Charles le Chauve (MEC 1c, Figure 100). Ces pièces portent au droit la titulature royale CARLVS REX FR – on retrouve la légende telle qu'elle apparaissait sur les émissions de Charlemagne postérieures à la réforme de 793/4 – inscrite autour d'une croix, et au revers une porte de ville entourée par le nom de l'atelier de frappe. Le nom d'Orléans est le plus fréquent pour les monnaies de ce type, et quelques exemplaires sont connus pour Chartres. Grierson et Blackburn soupçonnent la poursuite de la frappe de ce type monétaire après 864<sup>196</sup>.



**Figure 100** - Exemple de denier de Charles le Chauve du type à la croix et à la porte de ville (MEC 1c) frappé entre 840 et 864 (Prou 508 d'Orléans). D'après Prou.

Le quatrième type monétaire présenté par Grierson et Blackburn pour la première partie du règne de Charles le Chauve du point de vue monétaire est celui au monogramme carolin (MEC 1d, Figure 101). Les types de droit et de revers sont identiques à ceux des pièces du Type 3 de Charlemagne (793/4-812). Le droit des deniers au monogramme de Charles le Chauve porte la titulature CARLVS REX ou CARLVS REX FR en cercle autour d'une croix, et le revers le nom de l'atelier de frappe autour du monogramme carolin. Pour les oboles, le monogramme peut remplir le champ au droit, ou être entouré de la titulature royale de Charles. Le nom de l'atelier de frappe est inscrit en cercle autour d'une croix au revers.

---

<sup>195</sup> MEC p. 231.

<sup>196</sup> MEC p. 231.

Sous Charles le Chauve, la frappe des pièces au monogramme carolin s'est poursuivie après 864 pour certains ateliers monétaires, tandis que le Type Gratia Dei Rex consécutif à l'édit de Pîtres a été adopté pour les autres. La localisation géographique de certains d'entre eux dans une zone de l'empire de Charlemagne qui ne faisait pas partie du royaume de Charles le Chauve est le principal critère qui permet d'attribuer certaines pièces au premier empereur carolingien et non à son petit-fils. L'étude des trésors permet également d'identifier les officines qui ont fonctionné sous l'un de ces souverains seulement ou sous les deux. Enfin, l'évolution des légendes peut différencier les monnaies frappées durant l'un ou l'autre règne. Seuls certains exemplaires des ateliers monétaires de Melle et de Bourges demeurent problématiques pour une attribution à Charlemagne ou à Charles le Chauve<sup>197</sup>. Pour ce dernier souverain, Grierson et Blackburn distinguent des ateliers émetteurs de monnaies au monogramme carolin situés en Neustrie et en Bourgogne (Beauvais, Noyon, Compiègne et Chelles) d'autres qui se trouvaient dans le royaume d'Aquitaine (Bourges, Melle, Clermont, Agen et Dax)<sup>198</sup>. La question de l'attribution des monnaies au monogramme à Charlemagne ou à Charles le Chauve vaut pour les deniers comme pour les oboles dont le champ est rempli par le monogramme au droit.

Les pièces au monogramme carolin qui peuvent être attribuées avec certitude au Type 3 de Charlemagne ou au règne de Charles le Chauve ont été réparties dans notre catalogue en suivant ces critères. Les autres sont regroupées à la fin de ce catalogue sous l'appellation « Monnaies au monogramme carolin de période d'émission incertaine ».



**Figure 101** - Exemple de denier de Charles le Chauve du type au monogramme (MEC 1d) frappé à partir de 840 (Prou 740 de Bourges).

Les monnaies au temple constituent le cinquième type monétaire émis par Charles le Chauve avant 864, selon le classement de Grierson et Blackburn (MEC 1e, Figure 102). Les droit et revers de ces monnaies poursuivent ceux des pièces du Type 3 de Louis le Pieux frappé jusqu'à sa mort en 840 : la titulature – royale pour Charles, alors qu'elle était impériale pour Louis – est gravée en cercle autour d'une croix sur le coin correspondant au droit. De nombreuses variantes existent pour la

<sup>197</sup> (Coupland, 2005) p. 219.

<sup>198</sup> MEC p. 232.

graphie de cette légende. Le revers porte en cercle autour d'un temple le nom de l'atelier de frappe, ou la légende chrétienne héritée du Type 3 de Louis le Pieux XPISTIANA RELIGIO. Les légendes habituelles pour ce type monétaire sont inversées pour certains deniers : pour les pièces concernées, la titulature royale du droit encercle un temple et le nom de l'atelier de frappe est inscrit autour d'une croix au revers (Prou 441 de Tours). Grierson et Blackburn situent le début de la frappe de ces monnaies à 843 suite au traité de Verdun pour la plupart des ateliers, à l'exception de Bourges où elle n'aurait commencé qu'en 848<sup>199</sup>.



**Figure 102** - Exemple de denier de Charles le Chauve du type au temple (MEC 1e) frappé entre 840 et 864 (Prou 190 de Quentovic).

Lafaurie propose une chronologie succincte des émissions monétaires de Charles le Chauve antérieures à l'édit de Pîtres, selon laquelle le troisième type du classement de MEC (1c) serait une variante du second (1b)<sup>200</sup>. Selon ce numismate, le premier type monétaire frappé durant le règne de Charles le Chauve serait celui sur lequel apparaît au revers la légende XPISTIANA RELIGIO en cercle autour d'un temple (MEC 1e), dans la continuité du Type 3 des deniers de Louis le Pieux. A une date non définie par Lafaurie, la légende chrétienne aurait été remplacée par le nom de l'atelier émetteur (MEC 1e). Pour certaines des monnaies de ce type, une porte de ville apparaîtrait à la place du temple : il s'agit du troisième type du classement de MEC (1c). Les monnaies avec le nom de l'atelier émetteur dans le champ (MEC 1a) seraient apparues selon Lafaurie « à une date difficile à préciser mais avant 864<sup>201</sup> ». Les ateliers d'Aquitaine auraient débuté la frappe de deniers au monogramme à partir de la prise de Toulouse par Charles en 849.

L'approche de Coupland dans son article consacré aux monnaies de la Première période d'émission de Charles le Chauve consiste à étudier les pièces de chaque atelier, et de proposer une chronologie propre à chaque officine. Les ateliers d'Auxerre, de Bourges, Chartres, Clermont, Laon, Meaux, Melle, Orléans, Paris, Quentovic, Reims, St-Martin de Tours, Sens et Toulouse sont traités

<sup>199</sup> MEC p. 232.

<sup>200</sup> (Lafaurie, 1981) p. 116-117 et (Lafaurie, 1983) p. 141-142.

<sup>201</sup> (Lafaurie, 1981) p. 117.

individuellement<sup>202</sup>. Des associations entre des pièces sans mention de nom de ville et des lieux d'émission sont également proposées<sup>203</sup>.

Coupland propose de plus un essai de chronologie des émissions monétaires de la Première période d'émission de Charles le Chauve. La situation des ateliers d'Aquitaine est exposée en premier lieu.

Pour les ateliers de Bourges, Melle et Toulouse, l'émission des monnaies au monogramme carolin similaires à celles du Type 3 de Charlemagne (793/4-812) aurait commencé dès 840<sup>204</sup>. Des monnaies au temple auraient été frappées à Bourges et à Melle vers 845. A partir de l'été 845, les pièces de Melle auraient été frappées au nom de Pépin II d'Aquitaine suite à la prise de la ville par le rival de Charles le Chauve. Il en aurait été de même à Bourges à partir de 848, avant que Charles le Chauve ne reprenne le contrôle des deux cités. Des monnaies au buste à Bourges, au nom d'atelier en deux lignes à Melle, et au monogramme carolin à Toulouse, auraient alors été émises au nom de Charles après 849. La frappe des monnaies au monogramme carolin aurait repris à Melle comme à Bourges au début des années 850, et se serait poursuivie jusqu'au-delà de l'édit de Pîtres de 864.

Coupland propose d'identifier les pièces au temple et à la légende chrétienne comme les premières monnaies de Charles le Chauve pour Chartres, Orléans et Paris<sup>205</sup>. Le monnayage au temple et au nom d'atelier serait venu ensuite, puis les pièces au nom d'atelier dans le champ en deux lignes pour Paris, celles avec une porte de ville pour Orléans, Chartres, Meaux et Sens. En dehors de l'Aquitaine donc, les premières monnaies de Charles le Chauve auraient été celles au temple et à la légende chrétienne, auxquelles auraient succédé celles au temple et au nom d'atelier, puis selon les villes celles au nom d'atelier en deux lignes, à la porte de ville ou avec une croix au droit comme au revers.

### ***b. Charles le Chauve Deuxième période (864-877)***

L'édit de Pîtres de 864 est l'occasion d'une réforme monétaire importante qui vise à une réaffirmation du pouvoir royal sur la frappe monétaire. Le type général des nouvelles monnaies peut être décrit ainsi : le droit porte le monogramme carolin entouré par la légende GRATIA DEI REX – le plus souvent sous la forme GRATIA D I REX –, (« Roi par la grâce de dieu »). L'abréviation de cette légende a donné le nom d'usage de ce type monétaire, souvent appelé

---

<sup>202</sup> (Coupland, 1991) p. 126-141.

<sup>203</sup> (Coupland, 1991) p. 143-150.

<sup>204</sup> (Coupland, 1991) p. 150.

<sup>205</sup> (Coupland, 1991) p. 151.

« Type GDR »<sup>206</sup>. Le nom de l'atelier de frappe apparaît au revers des monnaies, en cercle autour d'une croix (Figure 103).



**Figure 103** - Exemple de denier de Charles le Chauve du Type GDR frappé à partir de 864 (Prou 88 de Maastricht).

Les monnaies qui devaient être frappées consécutivement à l'édit de Pîtres du 25 juin 864, d'après la description qui en est faite dans ce texte, ne correspondent pas à celles qui ont été retrouvées dans les nombreux trésors de cette époque. L'étude des trouvailles monétaires ne laisse aucun doute : les deniers du Type GDR décrits dans le paragraphe précédent ont bien été frappés à partir de 864. Leurs droit et revers ne sont toutefois pas ceux qui sont détaillés par l'article XI de l'édit de Pîtres, selon lequel les pièces nouvelles doivent porter au droit la titulature royale inscrite autour du monogramme carolin, et au revers le nom de l'atelier de frappe autour d'une croix<sup>207</sup>. Le type décrit par le texte est identique à celui des deniers de Charlemagne postérieurs à la réforme de 793/4. La frappe des deniers du Type GDR serait selon Prou consécutive à un texte légèrement postérieur à l'édit de Pîtres qui ne serait pas parvenu jusqu'à nous<sup>208</sup>. Lafaurie appuie cette hypothèse et avance que la reprise d'un type monétaire antérieur est peu compatible avec le but des renouvellements typologiques qui visent à éliminer de la circulation les fausses monnaies<sup>209</sup>.

Le nombre de noms d'ateliers de frappe que l'on retrouve sur les deniers du Type GDR contraste également avec ce qui est stipulé par l'article XII de l'édit de Pîtres. Celui-ci prévoit que la frappe des nouveaux deniers soit concentrée dans dix lieux d'émission seulement : au Palais, à Quentovic, Rouen, Reims, Sens, Paris, Orléans, Chalon-sur-Saône, Melle et Narbonne<sup>210</sup>. Un onzième atelier aurait été ouvert à Châlons-sur-Marne peu de temps après, selon un texte légèrement postérieur à l'édit de Pîtres. Or cent vingt-cinq noms de lieux différents peuvent être recensés sur les monnaies portant la légende GRATIA DEI REX. Selon

---

<sup>206</sup> Cette appellation doit être préférée à « type de l'édit de Pîtres » : les pièces frappées après 864 ne correspondent en effet pas à la typologie décrite par ce texte.

<sup>207</sup> (Lafaurie, 1981) p. 114.

<sup>208</sup> Prou p. LXII.

<sup>209</sup> (Lafaurie, 1981) p. 117.

<sup>210</sup> (Lafaurie, 1977) p. 491.

Lafaurie, cette incohérence entre le nombre de lieux d'émission autorisés et celui des noms qui figurent au revers de deniers du Type GDR s'expliquerait par l'existence d'ateliers collectifs qui auraient frappé des monnaies au nom de plusieurs cités<sup>211</sup>. Cette hypothèse est soutenue par des liaisons de coins de droit entre des monnaies dont les revers portent des noms de lieux différents. Grierson réfute cette idée : selon lui, l'utilisation de mêmes coins de droit pour frapper des monnaies dont le nom de lieu d'émission au revers diffère, peut s'expliquer par l'insécurité liée à la présence des Vikings, qui aurait entraîné des déplacements de monnayeurs<sup>212</sup>. Cette hypothèse écarte l'idée d'une volonté royale de centraliser la frappe de pièces portant des noms de lieux différents dans un même atelier.

Les monnaies du Type GDR ne sont pas les seules émissions au nom de Charles le Chauve postérieures à 864 : aucun atelier n'est connu pour avoir frappé de telles pièces en Aquitaine. L'émission des monnaies au monogramme carolin se serait poursuivie après cette date pour les ateliers de Melle, Bourges, Toulouse et Clermont<sup>213</sup>.

Des deniers portant une titulature impériale ont été émis au nom de Charles le Chauve entre mars 876 et 878. Charles était en effet empereur depuis la mort de son neveu Louis II d'Italie, fils de Lothaire, en 875. Les pièces impériales de Charles le Chauve portent au droit une titulature du type CARLVS IMP AVC en cercle autour d'une croix, et au revers le nom de l'atelier émetteur en cercle autour du monogramme carolin (Figure 104). MEC recense treize ateliers émetteurs pour ces monnaies<sup>214</sup>.



**Figure 104** - Exemple de denier impérial de Charles le Chauve frappé entre 875 et 877 (Prou 596 de Nevers). D'après Prou.

---

<sup>211</sup> (Lafaurie, 1968).

<sup>212</sup> MEC p. 233.

<sup>213</sup> MEC p. 232. Les ateliers de Dax et d'Agen cités par Grierson et Blackburn ne sont repris ici : la frappe des monnaies au monogramme carolin au nom de ces ateliers ne serait datée que du seul règne de Charlemagne, et pas de celui de Charles le Chauve d'après l'étude des trésors de Coupland. Voir (Coupland, 2005) p. 219.

<sup>214</sup> MEC p. 233.

### *c. Les monnaies impériales de Charles le Chauve (876-877)*

Les monnaies impériales de Charles le Chauve ont été frappées durant une brève période comprise entre mars 876 et octobre 877<sup>215</sup>. La titulature impériale apparaît sous la forme CARLVSIMPAVC autour d'une croix sur le droit de ces monnaies, et le revers porte le monogramme carolin au centre du nom de l'atelier émetteur (Figure 105).

Seuls certains ateliers parmi ceux ayant émis des pièces du Type GDR à partir de 864 sont connus pour ce monnayage. Les deux seuls pour lesquels un nombre d'exemplaire significatif est connu sont ceux de Nevers et de Bourges.



**Figure 105** - Exemple d'obole impériale de Charles le Chauve frappée entre 876 et 877 (Prou 745 de Bourges).

## **11. Les monnaies vénitiennes frappées au type carolingien**

### *a. Les monnaies vénitiennes du Type 2 de Louis le Pieux (818-822/3)*

Les premières monnaies connues portant le nom de Venise ont été émises au nom de Louis le Pieux. Leurs types de droit et de revers ainsi que leur présence en quantité dans les trésors d'Apremont-Veuillin et de Belvézet les classent parmi les deniers du Type 2 de Louis le Pieux frappés entre 818 et 822/3. La plupart de ces pièces portent au revers la légende +VEN/ECIAS en deux lignes (Figure 106), mais certains exemplaires présentent le nom de la ville adriatique en trois lignes sous la forme +VENE/CIASMO/NETA (BnF 1982-63).



**Figure 106** - Exemple de denier vénitien frappé au Type 2 de Louis le Pieux entre 818 et 822/3 (Prou 918).

Les deniers vénitiens similaires à ceux du Type 2 de Louis le Pieux constituent un monnayage particulier : la cité lacustre n'a, à aucun moment, fait partie intégrante de l'empire carolingien. A l'époque de Louis le Pieux, Venise est une des quelques cités d'Italie sous domination byzantine, mais bénéficie d'une

---

<sup>215</sup> MEC p. 233.



indépendance de fait. Les monnaies frappées à Venise à partir de 818 ne le sont donc pas au nom de l'autorité théorique dont la ville dépend, dont le cœur est situé à plusieurs milliers de kilomètres, mais à celui de la puissance la plus proche géographiquement.

Les conditions de la frappe de deniers au type carolingien à Venise demeurent floues. Aucun accord entre Carolingiens et Vénitiens sur la fabrication monétaire n'est connu pour le règne de Louis le Pieux. Seule l'étude des trésors de cette époque peut nous en apprendre davantage. Venise est l'atelier le plus représenté dans le trésor de monnaies du Type 2 de Louis le Pieux d'Apremont-Veuillin (195 pour un total de 755 deniers), et le troisième parmi les trente identifiés pour Belvèzet. Il semble donc que l'atelier de Venise se soit imposé dès sa création comme l'un des principaux émetteurs parmi tous ceux ayant frappé des deniers du Type 2 de Louis le Pieux. Les monnaies vénitiennes du Type 2 de Louis le Pieux, bien que frappées par une cité qui n'était pas sous domination carolingienne, circulaient concurremment aux autres pièces issues d'ateliers situés à l'intérieur de ce territoire.

Aucune obole vénitienne n'est connue pour le règne de Louis le Pieux.

### ***b. Les monnaies supposées vénitiennes du Type 3 de Louis le Pieux (822/3-840)***

Des deniers similaires à ceux du Type 3 de Louis le Pieux datés des années 822/3-840 ont été frappés par l'atelier de Venise (Figure 107). C'est du moins ce qui ressort de l'étude de Coupland qui voit une continuité stylistique entre certains des deniers au temple sans mention du lieu d'émission frappés au nom de Louis le Pieux et des pièces antérieures et postérieures qui portent le nom de Venise<sup>216</sup>.



**Figure 107** - Exemple de denier frappé au Type 3 de Louis le Pieux entre 822/3 et 840 (BnF 10321 attribuable à Venise).

Selon Coupland, les deniers vénitiens au temple frappés selon le Type 3 de Louis le Pieux se différencient des autres par le caractère massif des lettres formant les légendes et de la croix centrale au droit, ainsi que par des ligatures dans les légendes pour certains exemplaires<sup>217</sup>.

---

<sup>216</sup> (Coupland, 1990) p. 43-44.

<sup>217</sup> (Coupland, 1990) p. 44.

### c. *Le Type Xpe Salva Venecias (822/3-840 ?)*

Des deniers vénitiens qui ne portent pas le nom d'un souverain carolingien ont également été frappés à Venise durant le IX<sup>e</sup> siècle selon les standards de masse et de module carolingiens. Mais contrairement aux deniers vénitiens sur lesquels apparaît au droit la titulature de l'empereur Louis le Pieux, ceux qui nous intéressent ici portent sur cette face la légende DS CVSERVA ROMA NP qui pourrait se traduire « Dieu, préserve l'empereur des Romains » en cercle autour d'une croix, et au revers XPE SALVA VENECIAS (« Christ, sauve Venise », voir Figure 108).



**Figure 108** - Exemple de denier du Type *Xpe Salva Venecias* frappé vraisemblablement entre 822/3 et 840 (BnF 920g de Venise).

Les deniers que nous qualifions du « Type *Xpe Salva Venecias* » sont particulièrement rares. En plus des deux exemplaires étudiés, deux ont été retrouvés dans le trésor d'Hermenches (Canton de Vaud, Suisse)<sup>218</sup> ; douze autres sont également recensés dans le *Corpus Nummorum Italicorum*<sup>219</sup>, soit un total de seize monnaies connues.

La présence de deux de ces deniers dans le trésor d'Hermenches, aux côtés de trois cent vingt pièces du Type 3 de Louis le Pieux semble indiquer que les périodes d'émission des monnaies de ces deux types sont proches<sup>220</sup>. Les types de droit et de revers des deniers du Type *Xpe Salva Venecias* les rapprochent également des monnaies du Type 3 de Louis le Pieux : bien que leurs légendes diffèrent, celles-ci sont disposées en cercle autour d'une croix pour la première face, et en cercle au tour d'un temple pour la seconde. Grierson et Blackburn qualifient ce monnayage de « variante » du Type 3 de Louis le Pieux<sup>221</sup>. Coupland parle, quant à lui, d'émissions contemporaines du Type 3 de Louis le Pieux<sup>222</sup>. Leur datation pourrait donc être la même que celle des monnaies du Type 3 de Louis le Pieux, c'est-à-dire de 822/3 à 840, et non ultérieurement comme on aura pu le lire

<sup>218</sup> (Gruaz, 1922) p. 211.

<sup>219</sup> *Corpus Nummorum Italicorum - Veneto Venezia*, p. 7-8.

<sup>220</sup> (Gruaz, 1922) p. 193-212.

<sup>221</sup> MEC p. 217.

<sup>222</sup> (Coupland, 1990) p. 37.

dans des travaux plus anciens<sup>223</sup>. Rovelli enfin estime les années de leur émission autour de 830<sup>224</sup>.

Nous avons vu que la classification des monnaies sans mention d'atelier du type *XPISTIANA RELIGIO* par Coupland attribue certains exemplaires à l'atelier de Venise<sup>225</sup>. Cela pourrait suggérer que deux types monétaires différents ont été émis dans cette ville durant les mêmes années 822/3-840. Rien ne permet actuellement de préciser si ces émissions ont été consécutives ou concomitantes. Si l'attribution des deniers du Type *Xpe Salva Venecias* aux années 822/3-840 est exacte, il est notable que les monnaies frappées au nom de Venise retrouvent ensuite une titulature carolingienne et portent le nom de Lothaire pour la période 840-855.

La chronologie des émissions de deniers à Venise selon le standard carolingien pourrait donc se résumer ainsi : dans un premier temps, entre 818 et 822/3, les monnaies vénitiennes portent la titulature de l'empereur carolingien Louis le Pieux, bien que Venise ne soit pas une cité intégrée à ce territoire ; les deniers émis dans la cité lacustre portent au revers le nom de la ville abritant l'autorité émettrice, comme c'est le cas pour l'ensemble des monnaies de ce type (Type 2 de Louis le Pieux). Dans un deuxième temps, entre 822/3 et 840, deux types monétaires auraient été frappés à Venise : d'une part, des deniers du Type 3 de Louis le Pieux, vraisemblablement indiscernables aux yeux de la population de ceux issus d'ateliers monétaires situés à l'intérieur des frontières de l'empire carolingien, du fait de l'absence de mention de l'atelier émetteur ; d'autre part, les deniers du Type *Xpe Salva Venecias*, dont seules les légendes varient par rapport aux deniers du Type 3 de Louis le Pieux, et que l'on peut considérer comme le premier type vénitien propre, bien que largement inspiré de monnaies carolingiennes contemporaines. Dans un troisième temps, les pièces vénitiennes de Lothaire frappées entre 840 et 855 portent la titulature de cet empereur et le nom de l'atelier émetteur dans le champ comme pour l'ensemble des officines ayant produit de telles monnaies.

#### *d. Les monnaies vénitiennes au nom de Lothaire (840-855)*

Des deniers de Venise au nom de Lothaire sont connus, bien que la ville n'ait pas non plus été sous sa domination. Ces pièces portent au droit la titulature

---

<sup>223</sup> Papadopoli proposait par exemple 855-880. Voir (Papadopoli, 1893) p. 49.

<sup>224</sup> (Rovelli, sous presse) p. 20.

<sup>225</sup> (Coupland, 1990) p. 40 et suivantes pour l'ensemble de la classification ; (Coupland, 1990) p. 43-44 pour Venise.

impériale sous la forme HLOTHARIVSIMPAV, et au revers le nom de l'atelier dans le champ en une ligne (VENECIA, Figure 109).



**Figure 109** - Exemple de denier au nom de Lothaire frappé à Venise entre 840 et 855<sup>226</sup> (Prou 921).

Aucun denier vénitien de Lothaire n'apparaît dans les relevés de trouvailles monétaires de la période carolingienne alors que des exemplaires existent dans les collections<sup>227</sup>. Des monnaies du même type frappées à Milan, Pavie, Lucques et Trévise ont été retrouvées dans différents trésors, en particulier à Roermond, mais aucune en Italie ni en France<sup>228</sup>. Comme l'a relevé Coupland, « *It is surprising that Venice produced any coinage at all in Lothar's name, given that in 840 the latter signed a treaty with the port guaranteeing its independence and neutrality.*<sup>229</sup> ». Car, sous Lothaire comme sous ses prédécesseurs, Venise ne fait pas partie intégrante du territoire carolingien. Le statut officiel de la ville lacustre demeure celui d'une cité byzantine, mais elle garde son indépendance de fait.

Si la chronologie définie pour les deniers du Type *Xpe Salva Venecias* présentée plus haut est exacte, la frappe de deniers au nom de Lothaire montre que le monnayage vénitien abandonne les légendes religieuses qui lui étaient spécifiques au profit de la titulature du souverain carolingien dominant l'Italie du nord.

Coupland estime que la frappe monétaire à Venise durant les années de règne de Lothaire peut être séparée en deux périodes. Des deniers sans mention d'atelier et à la légende chrétienne sont ainsi attribués à Venise pour les années 840-850<sup>230</sup>, sur la base de critères stylistiques<sup>231</sup>, comme c'était le cas pour les pièces du Type 3 de Louis le Pieux (822/3-840) avec un revers similaire. Les monnaies au nom d'atelier dans le champ au revers, pour lesquelles l'attribution à

---

<sup>226</sup> Cette datation est inexacte pour cet exemplaire puisqu'il s'agit d'un faux moderne (voir *infra* p. 306). Il s'agit toutefois du seul exemplaire de la collection du Cabinet des Médailles, et donc du seul susceptible d'illustrer ce paragraphe sur les émissions vénitiennes au nom de Lothaire.

<sup>227</sup> Trois dans le *Corpus Nummorum Italicorum Veneto* p. 6.

<sup>228</sup> (Coupland, 2001) p. 176.

<sup>229</sup> (Coupland, 2001) p. 177-178.

<sup>230</sup> (Coupland, 2001) p. 165-166.

<sup>231</sup> (Coupland, 2001) p. 187.

Venise est indiscutable au contraire des précédentes, auraient pour leur part été émises durant les dernières années du règne de Lothaire entre 850 et 855.

## 12. Les émissions d'or

Des monnaies d'or sont connues pour certains souverains carolingiens. Elles peuvent être distinguées ainsi : d'une part, les *tremisses* frappés en Italie entre la conquête du royaume lombard par Charlemagne en 774 et l'introduction du denier d'argent sur le territoire italien récemment conquis en 781 ; d'autre part, les émissions de prestige de sous d'or qui ne sont pas spécifiques à l'Italie. Les monnaies d'or de Charlemagne frappées en Italie dans la continuité des tiers de sous lombards sont connues principalement à travers une quarantaine d'exemplaires mis au jour dans le trésor d'Ilanz<sup>232</sup>. Ces monnaies, comme les émissions exceptionnelles de Charlemagne et Louis le Pieux dites « de prestige », sont extrêmement rares<sup>233</sup>.

## D. Le corpus des monnaies analysées

Les monnaies analysées sont présentées selon leur type, par ordre chronologique. Le nombre d'exemplaires de chaque type et chaque sous-type est précisé, ainsi que les spécificités de certains exemplaires. Certaines révisions des attributions de période ou d'atelier qui apparaissent dans le catalogue de Prou, ainsi que des attributions nouvelles pour des monnaies regroupées sous l'appellation « atelier indéterminé » dans cet ouvrage, sont également discutées.

### I. Pépin le Bref (751-768)

Nombreux sont les deniers au nom de Pépin le Bref qui n'ont pas été attribués à un atelier par Prou dans son Catalogue des monnaies carolingiennes de la Bibliothèque Nationale. Certains des exemplaires regroupés sous l'appellation « ateliers indéterminés » ont depuis pu être associés de manière convaincante à une officine.

Les deniers référencés Prou 2, Prou 3 et Prou 4, à la légende du type AVT/TRΔ/N◇ au revers, ont fait l'objet de plusieurs attributions dont aucune n'a emporté l'adhésion de la communauté numismatique. Ces pièces, dont plusieurs du même type étaient présentes dans le trésor d'Imphy, sont classées par Prou dans son catalogue des monnaies carolingiennes parmi les exemplaires de Pépin le Bref

---

<sup>232</sup> (Bernareggi, 1983).

<sup>233</sup> (Grierson, 1951) et (Grierson, 1954b).

qui portent des noms de monétaires. Il y réfute dans la notice de Prou 2<sup>234</sup> l'hypothèse d'une attribution à Entrain proposée par Gariel<sup>235</sup>. Grierson reprend dans un premier temps les deux hypothèses de Prou à propos de monnaies similaires au nom de Charlemagne, et conteste l'hypothèse de Metcalf d'une émission de l'atelier de Saint-Denis (93)<sup>236</sup> ; dans un deuxième temps, le numismate de Cambridge propose une émission au nom de la ville d'Aintrain (35)<sup>237</sup>. Lafaurie soutient, quant à lui, l'idée d'un nom de monétaire<sup>238</sup>.

L'hypothèse la plus vraisemblable à l'heure actuelle, bien que l'information soit relativement confidentielle, est celle d'une frappe au nom de Saint-Denis qui a été proposée par Metcalf : les fouilles des années 1980 dans cette ville ont permis de mettre au jour des plaques de plomb sur lesquelles apparaît une empreinte identique à celle du revers des deniers de Pépin le Bref à la légende AVT/TRΔ/N◇<sup>239</sup>. Il s'agit là d'une découverte qui fait de l'hypothèse de Metcalf la plus pertinente. Prou 2, Prou 3 et Prou 4 ont en conséquence été attribués à l'atelier de Saint-Denis.

Par analogie avec le revers d'une monnaie de Charlemagne présentée par Lafaurie, Prou 922 peut être attribué à Angers<sup>240</sup>.

Prou 923 est vraisemblablement originaire de Chartres, et Prou 924 le serait également si l'on en croit Coupland, Lafaurie et Gariel<sup>241</sup>. Ces attributions qui nous

---

<sup>234</sup> Prou p. 1.

<sup>235</sup> Gariel I p. 42 et Pl. I n° 2.

<sup>236</sup> (Grierson, 1967) p. 512 et (Metcalf, 1965).

<sup>237</sup> Voir dans MEC la description de la pièce référencée 1.720.

<sup>238</sup> (Lafaurie, 1974) p. 42.

<sup>239</sup> Communication personnelle de Michel Dhénin. Selon ce numismate, les plaques auraient été utilisées pour nettoyer les coins, le plomb retenant les particules de métal incrustées. Malgré la coïncidence de l'attribution de Metcalf avec cette découverte, l'explication proposée par ce chercheur pour relier la légende des pièces et le nom de Saint-Denis reste peu convaincante ; l'hypothèse d'un nom de monétaire n'est donc pas totalement exclue.

<sup>240</sup> (Lafaurie, 1974), p. 39-40 et Pl. XII n. 4. Gariel avait mis en doute l'authenticité de Prou 922 en se basant sur la similarité du revers de ce denier avec un autre de « Carloman » (Gariel II p. 40-41). Selon cet auteur, il semble difficile de ne pas douter de l'authenticité d'un de ces deniers de Pépin le Bref et de Carloman au revers identique, alors que des liens entre les types de revers pour un même souverain sont difficiles à établir. Si l'on ajoute à ces deux exemplaires le denier de Charlemagne présenté par Lafaurie et qui porte lui aussi le même monogramme au revers, ce sont trois monnaies de trois souverains différents dont le revers est identique. L'exemplaire qui apparaît dans l'article de Lafaurie a été mis au jour lors de fouilles archéologiques en 1970 à Tours (Lafaurie, 1974), p. 47. Il semble difficile dans ces conditions de douter de son authenticité – du moins de son ancienneté. De plus, Lafaurie propose de revoir l'attribution à Carloman du denier de ce type. Il s'agirait pour lui d'une émission de Charlemagne (Lafaurie, 1974) p. 40. Cela nous incite donc à considérer Prou 922 comme authentique lui aussi. Voir également (Lafaurie, 1987).

<sup>241</sup> (Coupland, 2005 ; Gariel, 1883-4 ; Lafaurie, 1974)

semblent justifiées ont été prises en compte pour le classement de ces monnaies dans le Catalogue et pour l'interprétation des résultats analytiques.

Prou 927 porte une légende SCICI/RICI en deux lignes dans le champ au revers. Gariel propose une attribution au monastère de Saint-Cirgue<sup>242</sup>, tandis que c'est Saint-Cirgues de Clermont qui est avancé par Depeyrot<sup>243</sup>. Une attribution à l'atelier de Nevers serait toutefois plus probable : la dédicace à Saint-Cyr est en effet courante en Nivernais, Berry et Autunois ; or la pièce existe en trois exemplaires à Imphy, ce qui suggère qu'il pourrait s'agir d'un monnayage local. Ce trésor regroupe certes des pièces de diverses origines, mais Nevers, lieu d'émission le plus proche, n'apparaît jamais, sauf si l'on y attribue les exemplaires du type discuté ici. Il nous semble donc que l'attribution la plus probable pour Prou 927 et les pièces similaires est Saint-Cyr de Nevers<sup>244</sup>.

D'autres attributions qui n'ont pas été retenues ont également été proposées par le passé<sup>245</sup>. Gariel propose par exemple une origine mancelle pour Prou 925 (Gariel II 34). Cette attribution n'a pas été reprise dans les travaux ultérieurs, aussi elle n'a pas été retenue. Depeyrot suggère « *un atelier nordique, en raison de la localisation des trouvailles* » pour les monnaies du type de Prou 925, et propose une attribution à Dorestad<sup>246</sup>. La légende du revers devrait selon cet auteur être lue CIVI et non CINMA (pour *Cinoma*, pour Le Mans) en écriture rétrograde. Cette attribution n'a pas été retenue ici.

Prou 928, qui porte le nom de Saint-Pierre (SCI PIR), pourrait être de Trèves selon Lafaurie<sup>247</sup>. Les monnaies de ce type seraient de l'abbaye Saint-Pierre de Corbie pour Depeyrot<sup>248</sup>. Aucune de ces deux attributions n'a été retenue pour notre classement.

La proposition de Gariel d'attribuer les monnaies au revers avec deux ellipses entrelacées (Prou 86) à Maastricht reste selon nous une hypothèse certes possible, mais dont les bases sont discutables. La première lettre lue T par Gariel

---

<sup>242</sup> Gariel II p. 70.

<sup>243</sup> (Depeyrot 1998) n° 337.

<sup>244</sup> Merci à Olivier Bruand pour nous avoir suggéré cette attribution.

<sup>245</sup> Seules quelques-unes des attributions proposées principalement par Gariel, Depeyrot ou MG sont discutées ici.

<sup>246</sup> (Depeyrot 1998) p. 230-231.

<sup>247</sup> (Lafaurie, 1974) p. 47 et Fig. XII n° 5.

<sup>248</sup> (Depeyrot 1998) p. 2190-220.

serait pour Lafaurie un F couché<sup>249</sup>. Toujours selon Lafaurie, Prou 86 pourrait être un exemplaire copié d'un autre avec une erreur dans la transcription de la légende RxF du droit<sup>250</sup>. L'interprétation de Gariel du T qui serait un F couché pour Lafaurie, conduisant avec la lettre R de la légende à former le début du nom romain de Maastricht *Triecto*, serait donc caduque. Par analogie avec des pièces mérovingiennes dont le revers est similaire, les monnaies de Pépin avec une croix formée de deux ellipses au revers comme c'est le cas pour Prou 86 seraient d'un « atelier indéterminé du Nord de la Gaule<sup>251</sup> » sans qu'il soit possible d'en préciser davantage la provenance. Nous en resterons donc à cette seule indication de région d'origine.

Prou 980 ne porte pas de mention d'atelier : la légende de son droit est ΠPIPI, et celle de son revers RxF. Le lieu d'émission de cette pièce ne peut donc pas être connu avec précision. La présence d'une hache au droit de ce denier peut toutefois laisser penser qu'il a été frappé dans un atelier frison ou en région rhénane : des monnaies de Dorestad et de Bonn du Type 2 de Charlemagne portent également cette distinction. L'étude des lieux de trouvailles de tels exemplaires renforce cette hypothèse<sup>252</sup>. Grierson et Blackburn avancent qu'il s'agit probablement de Dorestad<sup>253</sup>. Cela ne peut être assuré, Prou 980 a donc été classé parmi les exemplaires issus d'ateliers indéterminés.

Depuis la rédaction du catalogue de Prou, la collection de la BnF s'est enrichie de cinq nouvelles monnaies de Pépin le Bref. Il s'agit des exemplaires référencés BnF 1991-15, BnF 1997-115, BnF 925a, BnF 926a et BnF 929a. Les deux premiers portent respectivement les noms de Reims et de Tours, les deux suivants sont issus d'ateliers indéterminés, et le dernier de Sainte-Croix d'Orléans.

Vingt-six monnaies au nom de Pépin le Bref ont été analysées dans le cadre de cette thèse. Dix-sept d'entre elles portent au droit le monogramme de Pépin roi RP, et six une légende de type R<sub>x</sub>F. Les trois dernières portent au droit une légende qui fait apparaître le nom de Pépin sous différentes formes et au revers R<sub>x</sub>F.

---

<sup>249</sup> (Lafaurie, 1974) p. 47 Pl. XII n° 10.

<sup>250</sup> (Lafaurie, 1974) Pl. XII n° 9.

<sup>251</sup> (Lafaurie, 1974), p. 47 à propos de la monnaie n° 9 Pl. XII, et par analogie pour la n° 10=Prou 86 sur la même planche. Le relevé des trouvailles de *tremisses* d'or mérovingiens qui présentent un type de revers similaire à celui des deniers de Pépin le Bref semblables à Prou 86 renforce l'hypothèse de l'émission d'un atelier du nord du territoire franc. Voir (Lafaurie, 1996) p. 206-207.

<sup>252</sup> (Lafaurie, 1974) p. 40.

<sup>253</sup> Voir dans MEC la description de l'exemplaire référencé 1.719.



Parmi les vingt-six monnaies de notre *corpus*, neuf proviennent d'ateliers qui demeurent non identifiés. Les dix-sept autres sont originaires de lieux situés entre Seine et Rhin pour la majorité (Verdun, Quentovic, Amiens, Reims, Paris, Saint-Denis, Troyes, Nevers), d'entre Loire et Seine pour la plupart des autres (Chartres, Orléans, Tours, Angers) à l'exception d'un exemplaire de Lyon.

## **II. Carloman (768-771)**

Le seul denier de Carloman du catalogue des monnaies carolingiennes de la Bibliothèque Nationale est Prou 762 de Clermont. La présence d'un M dans le monogramme justifie son attribution à ce souverain<sup>254</sup>. Une acquisition postérieure à la constitution du catalogue de Prou, BnF 506a, porte au droit la légende CAR/LOM dans le champ en deux lignes, qui démontre une frappe par le frère de Charlemagne. La légende SCI ANIANI qui apparaît sur son revers l'attribue à Saint-Aignan d'Orléans<sup>255</sup>. BnF 506a provient du trésor d'Imphy.

## **III. Charlemagne (768-814)**

Les monnaies des Types 1 et 2 de Charlemagne ont été regroupées par Prou dans son catalogue sous l'appellation « Charlemagne, roi. 1<sup>ère</sup> période ». L'ensemble des exemplaires attribués par Prou à Charlemagne et qui ne portent ni monogramme ni buste y ont été numérotés en suivant le classement géographique en vigueur dans son catalogue des monnaies de la Bibliothèque Nationale.

Les avancées de la numismatique carolingienne effectuées depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle ont permis l'établissement de critères typologiques qui permettent de différencier les monnaies des deux premiers types de Charlemagne. Les particularités présentées dans les paragraphes spécifiques à ces deux types monétaires ont été considérées et chaque exemplaire a été attribué à l'une des deux périodes<sup>256</sup>.

### **1. Charlemagne Type 1 (768-771)**

Parmi les monnaies de Charlemagne de la BnF antérieures à la réforme de 793/4, sept peuvent être attribuées au Type 1 de Charlemagne. Le droit de quatre d'entre elles correspond à l'un des types décrits par Coupland<sup>257</sup> ou Grierson<sup>258</sup> : Prou 42, BnF 230a, Prou 488 et Prou 930. D'autres variantes existent dont la

---

<sup>254</sup> (Lafaurie, 1974) p. 40.

<sup>255</sup> (Lafaurie, 1974) p. 47 et Fig. XIII n° 1.

<sup>256</sup> Voir *supra* p. 218 pour le Type 1 et p. 219 pour le Type 2.

<sup>257</sup> (Coupland, 2005) p. 213.

<sup>258</sup> (Grierson, 1967) p. 511.

légende n'est pas sous la forme CARO/LVS en deux lignes qui caractérise le Type 2 : Prou 941, qui porte au droit KARx dans le champ et un F horizontal dessous, et Prou 938 dont la légende +CARLVOR est circulaire<sup>259</sup>. Le classement de Grierson confirme l'attribution de la plupart de ces monnaies à la première période d'émissions monétaires de Charlemagne<sup>260</sup>. L'attribution à Worms de Prou 941 par ce numismate, classé parmi les exemplaires dont l'atelier de frappe est indéterminé dans le catalogue de Prou, a été conservée ici<sup>261</sup>. Prou 930 serait probablement de l'atelier de Bingen en Allemagne. Prou 6 enfin porte une légende au droit qui l'attribue à Charlemagne, mais qui ne correspond pas au standard observé pour le Type 2 de ce souverain<sup>262</sup>. Il s'agirait donc d'un exemplaire attribuable au Type 1 de Charlemagne. La légende au revers de ce denier pourrait être le nom d'un monétaire (*Fiufarius* ?).

Aucune des pièces carolingiennes acquises depuis la rédaction du catalogue des monnaies de la BnF par Prou n'appartient au Type 1 de Charlemagne.

## 2. Charlemagne Type 2 (771-793/4)

Les nouvelles acquisitions de la BnF pour les monnaies du Type 2 de Charlemagne sont les suivantes : BnF 6a (Atelier indéterminé), BnF 7a (Atelier indéterminé), BnF 1988-136 (Verdun), BnF 230a (Amiens), BnF 316a (Paris), BnF 375a (Rouen), BnF 439bis (Tours, Basilique de Saint-Martin), BnF 1976-70 (Tours, Eglise de Saint-Maurice), BnF 489a et BnF 1988-135 (Chartres), BnF 388 et BnF 389 (Melle), BnF 763a (Clermont), BnF 895bis (Atelier indéterminé d'Italie), BnF 2000-109 (Marseille), BnF 890a (Atelier indéterminé), BnF 1988-137 (Plaisance ?) et BnF 1993-26 (Laon, Eglise de Sainte-Marie).

Pour les monnaies du Type 2 de Charlemagne comme pour les émissions carolingiennes précédentes, les progrès de la numismatique permettent d'attribuer certains des exemplaires qui n'avaient pu l'être par Prou.

Prou 85 est attribué par Prou à un « *Atelier indéterminé de la région rhénane*<sup>263</sup> ». Ce denier porte au revers la légende BAB au-dessus des lettres SCS

---

<sup>259</sup> L'analyse de Prou 941 a révélé un titre d'argent très faible, laissant supposer qu'il pourrait s'agir d'un faux. Le type de droit particulier de ce denier semble pourtant avoir existé pour des pièces qui ont circulé au temps de Charlemagne : il est en effet similaire à celui d'une des monnaies du trésor d'Imphy. Voir (de Longpérier, 1858), pl. XIII, n° 33.

<sup>260</sup> (Grierson, 1967) p. 508.

<sup>261</sup> Grierson reconnaît néanmoins qu'une attribution à Verdun n'est pas impossible. (Grierson, 1967) p. 512.

<sup>262</sup> Voir (Lafaurie, 1974), p. 41, p. 48 et Fig. XV n° 4.

<sup>263</sup> Prou p. 13.

disposées horizontalement, et au-dessous d'une hache. Il semble que les exemplaires de ce type puissent être attribués à l'atelier monétaire de Saint-Bavon de Gand (Belgique) : c'est en effet ce que propose Grierson d'après la mention de l'abbaye de Saint-Bavon dans un document Gantois de la fin du VIII<sup>e</sup> siècle<sup>264</sup>. La présence d'une hache au revers de cet exemplaire, caractéristique de certaines émissions des vallées de la Meuse et du Rhin, renforce une telle hypothèse. C'est donc à l'abbaye Saint-Bavon de Gand que Prou 85 est attribué.

Les quatre deniers Prou 887 à Prou 890 à la légende ARDIS en deux lignes ou dans les cantons d'une croix centrale sont très probablement de l'atelier d'Arles.

Prou 931 et Prou 932, dont les noms de lieu d'émission au revers sont respectivement CAVI et ICA/IVI, sont probablement issus de l'atelier monétaire de Chalon-sur-Saône.

Prou 933 peut être attribué à l'atelier d'Huy si l'on en croit Serrure et Völckers<sup>265</sup>.

Coupland et Lafaurie attribuent à Mayence les pièces du même type que celles référencées Prou 935, Prou 936 et Prou 937<sup>266</sup>. Par analogie avec une monnaie du Type 1 de Charlemagne également attribuée à Mayence par Grierson<sup>267</sup>, l'association de ces trois monnaies à cette ville semble être justifiée.

Prou 934 serait de « Cluses » d'après MEC<sup>268</sup> mais la localisation précise de cet atelier ne peut être établie. Cet exemplaire apparaît donc parmi ceux issus d'ateliers de frappe qui n'ont pu être identifiés.

Enfin, l'origine d'un des deniers que Prou localise en Italie du fait de la légende RxF dans le champ au revers doit, selon nous, être revue (Prou 891) : Coupland mentionne en effet des deniers qui portent cette légende et qui auraient été frappés en dehors d'Italie<sup>269</sup>. Le dessin des lettres, ainsi que le module du flan, plus faible que celui des deniers dont l'origine italienne n'est pas mise en doute, plaident en faveur de cette hypothèse. Prou 891 a donc été dissocié des deniers

---

<sup>264</sup> (Grierson, 1977) p. 59-60.

<sup>265</sup> (Serrure, 1884-1885) p. 152 et (Völckers, 1965) p. 171.

<sup>266</sup> (Coupland, 2005) p. 215 et (Lafaurie, 1972) p. 48-49.

<sup>267</sup> (Grierson, 1967) Pl. I n° 2.

<sup>268</sup> MEC Pl. 33 n. 1.723.

<sup>269</sup> (Coupland, 2005) p. 217.

italiens frappés avant 793/4, et classé parmi les pièces dont le lieu d'émission est inconnu.

Vingt-trois deniers du Type 2 de Charlemagne ne portent pas de nom de lieu d'émission, ou présentent des légendes qui n'ont pas pu être associées avec des ateliers de frappe.

Parmi ceux qui ne présentent pas de mention d'un lieu d'émission, l'origine de sept exemplaires peut être établie en Italie du fait de la mention RxF au revers. Pour synthétiser les hypothèses actuelles les plus convaincantes, Prou 893 serait de Crémone ou de Mantoue, Prou 894 pourrait être de Vérone, BnF 1988-137 de Plaisance, et Prou 895 est probablement de Milan<sup>270</sup>. Prou 892 et BnF 895bis n'ont pas, à notre connaissance, été associés à des ateliers de frappe par le passé de manière convaincante<sup>271</sup>. La totalité des monnaies de Charlemagne du Type 2 dont l'origine est supposée italienne sont du type à la légende RxF au revers qui aurait été frappé entre 781 et 786/7. Aucun denier de la seconde période supposée des émissions carolingiennes en Italie antérieure à la réforme de 793/4 (nom d'atelier dans le champ au revers) n'est contenu dans la collection de la BnF. Les monnaies de ce type n'ont en conséquence pas pu être incluses à notre *corpus*.

Parmi les deniers émis en dehors d'Italie dont le lieu d'émission ne peut être établi, quatre portent au revers A/R/D/IS dans les cantons d'une croix (Prou 888 à Prou 890), ou AR/DIS dans le champ en deux lignes (Prou 887). Une attribution à l'atelier d'Arles a été suggérée par le passé<sup>272</sup>. Cette hypothèse est peu probable d'après MEC<sup>273</sup>. La disposition de la légende dans les quatre cantons de la croix centrale a fait penser à Prou que ces monnaies sont issues d'un atelier provençal : des exemplaires de Marseille et d'Avignon présentent également une légende de revers disposée ainsi. On retrouve cependant pour une monnaie attribuée à Verdun par Prou une disposition similaire des lettres V/R/D/N formant le nom de la ville (Prou 143), et peut-être pour Worms (Prou 941). Prou 887 à

---

<sup>270</sup> Voir (Lafaurie, 1974) p. 47. Les attributions de Lafaurie pour les deux premières monnaies citées sont motivées par l'existence, pour la première, d'un *C* et d'un *E* de part et d'autre du *R* de la légende *RF* du revers (on retrouve ainsi le début du nom de Crémone), et pour la seconde par la présence d'un *V* entre le *R* et le *F* au revers. Un denier similaire à Prou 895 apparaît dans les planches de ce même article de Jean Lafaurie, qui attribue cette monnaie portant un monogramme au revers à l'atelier de Milan. Voir (Lafaurie, 1974) p. 48. L'attribution à Venise des monnaies du type de Prou 894 qui a été proposée par le passé ((Depeyrot, 1998) p. 279, ref 116B) est peu probable et rejetée par Rovelli (Rovelli, sous presse), p. 20 n. 50. Pour l'état de la question des ateliers italiens voir (Rovelli, sous presse).

<sup>270</sup> Prou 678 à Prou 680 p. 96.

<sup>271</sup> L'attribution de BnF 895bis à Ravenne par Sambon n'est pas acceptée par Lafaurie. Voir (Sambon, 1912) Pl. VIII n° 573 et (Lafaurie, 1972) p. 55.

<sup>272</sup> Gariel I n° 12.

<sup>273</sup> Description de la monnaie référencée 722 Pl. 33 p. 520.

Prou 890 peuvent donc, selon nous, provenir de l'ensemble du territoire carolingien. L'appellation « atelier indéterminé de la Provence » proposée par Prou pour ces monnaies est donc incorrecte, et la dénomination « atelier indéterminé » a été préférée pour notre catalogue.

Quatre-vingt-six deniers du Type 2 de Charlemagne ont ainsi été analysés. S'y ajoutent trois oboles, toutes au nom de Melle.

### 3. Louis roi d'Aquitaine (781-793/4)

Le catalogue de Prou des monnaies carolingiennes ne recense aucune des émissions de Louis roi d'Aquitaine qui ont été frappées durant le règne de Charlemagne avant la réforme de 793/4<sup>274</sup>.

L'acquisition en 1989 du trésor de Breuvery-sur-Coole a permis de doter la collection nationale française de quelques-uns des rares exemplaires de deniers frappés au nom de Louis en tant que roi d'Aquitaine. Trois de ces monnaies ont donc pu être analysées. L'une est de Clermont en Auvergne, la deuxième de Saint-Sulpice, probablement de Bourges, et la troisième d'un atelier que Lafaurie a proposé comme celui de Saint-Romain de Blaye, près de Bordeaux<sup>275</sup>.

### 4. Charlemagne Type 3 (793/4-812)

Quatre des exemplaires de notre *corpus* de monnaies du Type 3 de Charlemagne sont des acquisitions « récentes » qui ne figurent pas dans le catalogue de Prou<sup>276</sup>. Il s'agit de deniers italiens de Milan (BnF 906b), de Trévisé (BnF 912bis) et de Lucques (BnF 916a), et de BnF 190a de Quentovic.

La normalisation des types de droit et de revers par rapport aux deniers antérieurs à la réforme de 793/4 facilite leur attribution à des lieux d'émission. De ce point de vue, seules quelques mises à jour du classement effectué par Prou pour les monnaies attribuées avec certitude au Type 3 de Charlemagne doivent être effectuées.

---

<sup>274</sup> Les monnaies que Prou répertorie sous l'appellation « Louis le Pieux, roi d'Aquitaine (781-814) » datent en réalité de la période d'émission du Type 2 de Louis le Pieux empereur (818-822/3). Les exemplaires concernés sont Prou 655 et Prou 656 au nom d'Aquitaine, Prou 709, Prou 710 et Prou 711 de Melle et Prou 733 de Bourges.

<sup>275</sup> (de Benedettis et Lafaurie, 1998) p. 238.

<sup>276</sup> Des monnaies de Melle au monogramme carolin figurent également parmi les nouvelles acquisitions de la BnF ; l'incertitude de leur attribution à Charlemagne ou à Charles le Chauve nous a incité à les présenter séparément dans le paragraphe consacré aux monnaies au monogramme carolin de souverain indéterminé (Voir *infra* p. 279).

Prou 212, à la légende +TVN+NI $\infty$  au revers, est attribué par l'auteur du Catalogue des monnaies carolingiennes de la Bibliothèque Nationale à Thun, dans le Nord. Il s'agirait en réalité plutôt de Thuin, en actuelle Wallonie (Hainaut, Belgique), si l'on en croit Frère et Depeyrot qui reprennent cette information. Coupland classe en revanche les deniers du type de Prou 212 parmi ceux qui ne peuvent être associés à un atelier monétaire<sup>277</sup>. L'hypothèse d'une attribution à Thuin n'a pas été reprise dans notre catalogue, et Prou 212 est classé parmi les exemplaires issus d'ateliers qui ne peuvent être identifiés.

Les deux deniers Prou 40 et Prou 41, dont la mention du lieu d'émission au revers est SENNES, sont référencés dans un paragraphe spécifique à un atelier du nom de « Sennes », qui serait situé selon Prou en « *région rhénane*<sup>278</sup> ». Depeyrot propose une attribution à Sennheim, en Allemagne, sans justifier cette proposition ni citer de référence. Prou 40 et Prou 41 ne peuvent être attribués de manière satisfaisante à un lieu d'émission, ces deux deniers sont donc regroupés avec les exemplaires issus d'ateliers indéterminés dans notre catalogue.

Les deniers au monogramme carolin d'Agén Prou 792, Prou 793 et Prou 794 attribués à Charles le Chauve seraient de Charlemagne d'après l'étude des trésors de Coupland<sup>279</sup>. Les exemplaires à la légende AGINNO ou AGIN CIVITAS seraient toutes des émissions du premier empereur carolingien.

La dernière modification d'attribution possible concerne la monnaie répertoriée sous la référence Prou 799 : ce denier serait selon Lafaurie d'Aix-la-Chapelle et non de Dax, et de Charlemagne plutôt que Charles le Chauve<sup>280</sup>. Cette attribution à Aix-la-Chapelle n'est pas argumentée par Lafaurie et n'a pas été reprise par d'autres numismates à notre connaissance. Coupland mentionne de plus Dax parmi les ateliers émetteurs de pièces au monogramme carolin sous Charlemagne<sup>281</sup>. C'est donc l'atelier de Dax auquel Prou 799 est rattaché dans notre catalogue. En revanche, il s'agirait bien d'un exemplaire de Charlemagne, et pas de Charles le Chauve comme cela apparaît dans Prou<sup>282</sup>.

Plus que les questions d'attribution des monnaies à un lieu d'émission, c'est la définition de la période de frappe qui pose problème pour certains des exemplaires au monogramme carolin. La similarité typologique des monnaies de Charlemagne durant la période 793/4, avec certains exemplaires de Charles le

---

<sup>277</sup> (Coupland, 2005) p. 221.

<sup>278</sup> Prou p. 7.

<sup>279</sup> (Coupland, 2005) p. 218.

<sup>280</sup> (Lafaurie, 1983) p. 145 et Pl. 13 n° 1.

<sup>281</sup> (Coupland, 2005) p. 219.

<sup>282</sup> (Coupland, 2005) p. 218 et 219.

Chauve à partir de 840, a entraîné des erreurs d'attribution par le passé pour les pièces de ce type. Dans le cas du catalogue de Prou, des nuances doivent être apportées pour certaines attributions qui ne semblent pas justifiées en l'état des connaissances. Les ateliers de Melle, Bourges et Toulouse sont concernés. La discussion de ces questions ne se limite pas aux seules émissions de Charlemagne au monogramme, mais aussi à celles de Charles le Chauve du même type. Les attributions de monnaies au monogramme carolin à l'un de ces deux souverains, et les incertitudes qui entourent certains exemplaires sont discutées dans un paragraphe spécifique<sup>283</sup>.

Un type de denier du Type 3 de Charlemagne (Prou 896) avec un droit « classique » pour cette période (CARLVS REX FR en cercle autour du monogramme carolin) présente un revers inhabituel : la légende se poursuit au revers (ET LANG AC PAT ROM, soit « Charles, roi des Francs et des Lombards, et patrice des Romains ») autour d'un monogramme, dont les difficultés de lecture et d'interprétation ont contribué au débat au sujet de son attribution<sup>284</sup>. Les différentes lectures du monogramme du revers ont conduit à associer cette monnaie aux ateliers de Ravenne et Rome principalement, et même de Venise. Les mentions de Rome et du peuple lombard, ainsi que la présence d'un monogramme qualifié de « grec », ont conduit la plupart des auteurs à rattacher l'origine des deniers de ce type à l'Italie, et plus particulièrement aux possessions byzantines qui y demeuraient à la fin du VIII<sup>e</sup> siècle. La découverte récente d'une monnaie de l'atelier de Vienne (38) sur laquelle figure le même monogramme caractéristique a cependant élargi les possibilités d'attribution des deniers à la légende ET LANG AC PAT ROM<sup>285</sup>. Prou 896 est donc d'un atelier qui ne peut être identifié en l'état actuel des connaissances. L'existence d'une monnaie de Vienne avec un monogramme identique ne limite plus les recherches à la seule Italie, aussi Prou 896 a été regroupé dans notre catalogue avec les autres deniers du Type 3 de Charlemagne dont l'atelier de frappe ne peut être déterminé, et non plus avec les émissions italiennes comme c'est le cas dans celui de Prou.

Les deux deniers Prou 942 et Prou 943 qui portent la légende EX METALLO NOVO ont été classés par Prou parmi les monnaies issues d'un atelier indéterminé. Grierson et Blackburn datent l'émission des deniers de ce type du

---

<sup>283</sup> Voir *infra* p. 279.

<sup>284</sup> Voir à ce sujet (Rovelli, 2003) et (Rovelli, sous presse) p. 18 n. 83.

<sup>285</sup> (Crinon et Bedel, 2003) et (Rovelli, 2003).

règne de Charlemagne, du fait de la présence d'un tel exemplaire dans le trésor d'Ibersheim<sup>286</sup>.

Si l'origine des deniers à la légende EX METALLO NOVO ne peut en l'état actuel des connaissances être établie avec certitude, certaines suggestions ont été émises pour les monnaies au monogramme de ce type. Coupland interprète la légende EX METALLO NOVO comme l'expression de l'ouverture d'une nouvelle mine dont l'argent aurait été utilisé à des fins de fabrication monétaire. Il s'appuie sur le faible nombre de tels deniers retrouvés dans des trésors pour supposer que l'exploitation de cette mine aurait été de faible importance<sup>287</sup>. MEC mentionne les deniers à la légende EX METALLO NOVO dans la partie consacrée au monnayage de Melle, ce qui montre que les auteurs de cet ouvrage les associent à cet atelier de frappe<sup>288</sup>. Comme pour les monnaies à la légende METALL GERMAN dont un exemplaire est présenté plus loin<sup>289</sup>, la légende EX METALLO NOVO pourrait être commémorative de la découverte d'une nouvelle veine dans le gisement minier de Melle<sup>290</sup>. Bien que seulement deux exemplaires de la BnF de ce type aient été analysés selon cette approche, les rapports isotopiques du plomb qui caractérisent l'origine du minerai d'argent confirment la possibilité d'une origine melloise pour les deniers à la légende EX METALLO NOVO<sup>291</sup>. Aucune des deux hypothèses ne semble à l'heure actuelle préférable à l'autre. La variété d'écriture du nom de Melle sur les monnaies dont l'attribution à cet atelier ne fait aucun doute<sup>292</sup> nous incite à nous orienter vers cette même attribution pour les deniers à la légende EX METALLO NOVO. Cela n'est toutefois pas suffisant pour l'affirmer, aussi les deniers Prou 942 et Prou 943 restent classés en tant que monnaies issues d'un

---

<sup>286</sup> MEC p. 237.

<sup>287</sup> (Coupland, 2005) p. 221.

<sup>288</sup> MEC p. 237. L'association des monnaies à la légende EX METALLO NOVO à l'atelier de Melle incite à la prudence quant à leur attribution au seul règne de Charlemagne : nous le verrons plus loin, les monnaies melloises au monogramme peuvent avoir été frappées durant le règne de Charlemagne comme durant celui de Charles le Chauve (Voir *infra* p. 279). La trouvaille d'un tel denier dans le trésor d'Ibersheim les rapproche, du moins pour partie, de Charlemagne ; la faible probabilité de reprise sous Charles le Chauve de la frappe d'un type qui semble marginal sous Charlemagne, ainsi que l'absence de tels deniers dans les trésors postérieurs à 840, nous ont incité à les attribuer à Charlemagne seul, bien qu'il ne puisse être totalement exclu que certaines de ces émissions soient de Charles le Chauve.

<sup>289</sup> Voir *infra* p. 271.

<sup>290</sup> MEC p. 236.

<sup>291</sup> (Téreygeol *et al.*, 2005) p. 54.

<sup>292</sup> Avant la réforme de Charlemagne *Medolvs* ou *Metolo* avec des variétés nombreuses dans l'écriture de certains caractères ; après cette réforme *Metvlllo* jusqu'en 812, puis vraisemblablement *Metall german* jusqu'en 814. Sous Louis le Pieux *Metallvm*, que poursuit Charles le Chauve sur les deniers au nom d'atelier en deux lignes, et *Metvlllo* à nouveau sous Charles le Chauve et Pépin II d'Aquitaine pour les pièces au monogramme carolin.



atelier indéterminé dans notre catalogue. Leur cas spécifique est néanmoins examiné lors de l'interprétation des résultats obtenus pour les pièces de Melle.

Parmi les oboles au monogramme carolin de la collection de la BnF attribuées par Prou à Charles le Chauve, une est probablement de l'époque de Charlemagne<sup>293</sup>. Il s'agit de Prou 795 de l'atelier d'Agen, qui porte au droit le monogramme carolin dans le champ et la légende AGINNO en cercle autour d'une croix au revers. L'obole récemment acquise BnF 1983-44, du même type que Prou 795, peut elle aussi être attribuée au Type 3 de Charlemagne.

Ce sont donc au total quarante-six deniers<sup>294</sup> et deux oboles dont l'attribution au Type 3 de Charlemagne est certaine ou très probable qui sont inclus dans notre *corpus* d'analyse.

#### **5. Charlemagne Type 4 (812-814)**

Aucune des monnaies acquises par la BnF depuis la publication du catalogue de Prou ne présente les caractéristiques des monnaies du Type 4 de Charlemagne.

Les trois monnaies au buste de Charlemagne classées par Prou comme exemplaires de la période d'émission impériale ont été analysés (Prou 981, Prou 982 et Prou 983). Aucun ne porte de nom d'atelier. Leur revers est du type au temple entouré par la légende XPICTIANA RELIGIO.

Les attributions proposées sur la base de lettres caractéristiques associées au buste de l'empereur au droit de certaines monnaies<sup>295</sup> permettent d'associer Prou 981 à Mayence. L'absence de telles lettres sur Prou 982 et Prou 983, qui ne portent pas non plus de mention complète de lieu d'émission, ne permet pas de lever l'indétermination de leur lieu de frappe.

La monnaie Prou 972 serait de Charlemagne si l'on en croit Grierson<sup>296</sup> et Coupland<sup>297</sup>, et non de Charles le Gros comme le proposait Prou<sup>298</sup>. Cette pièce porte au droit un buste entouré de la légende KARLVS IMP AVG, et au revers

---

<sup>293</sup> (Coupland, 2005) p. 219.

<sup>294</sup> Prou 31 de Mayence n'a pas pu être analysé : ce denier aurait été échangé, d'après une note sur le plateau du médaillier au Cabinet des Médailles de la BnF. Il apparaît toutefois dans notre catalogue afin que son absence ne soit pas interprétée comme un oubli.

<sup>295</sup> Voir *infra* p. 228.

<sup>296</sup> (Grierson, 1967) p. 521 et Pl. I n° 24.

<sup>297</sup> (Coupland, 2005) p. 224 et Pl. I n° 2.

<sup>298</sup> Voir la notice de cet exemplaire dans Prou p. 136.

METALL GERMAN en cercle autour d'outils de monnayeurs. La légende du revers des monnaies de ce type a d'abord fait penser que leur origine devait être localisée en Allemagne (*Germanicum*). Une autre interprétation a été émise, qui rattache les monnaies à la légende METALL GERMAN à la mine et donc à l'atelier de Melle. Le terme METALL ferait référence au nom de Melle, et GERMAN doit être compris comme « *genuine*<sup>299</sup> », soit « authentique ». Grierson et Blackburn mentionnent de plus que les deniers qui portent METALL GERMAN, comme ceux avec EX METALLO NOVO, pourraient être des émissions dont la légende commémore la découverte d'une nouvelle veine de minerai<sup>300</sup>. Pour les monnaies à la légende METALL GERMAN du type de Prou 972, la présence d'outils de monnayeurs rappelle le revers des monnaies de Melle du Type 1 de Louis le Pieux (Prou 712 par exemple) qui suit immédiatement le Type 4 de Charlemagne. Cela suggère donc une attribution à Melle, même si la légende du revers n'est pas véritablement le nom de cet atelier<sup>301</sup>. La signature isotopique de Prou 972 renforce l'hypothèse d'une origine melloise, bien que ce type d'analyse ne permette pas de conclure de manière catégorique<sup>302</sup>.

Bien que Grierson remarque que la différence de gravure entre cette monnaie et les autres deniers du même type ait suggéré à d'autres qu'elle pourrait être plus tardive, celle-ci est mentionnée dans son article consacré au monnayage de Charlemagne<sup>303</sup>. MEC mentionne des monnaies du Type 4 de Charlemagne à la légende METALL GERMAN autour d'outils de monnayeurs<sup>304</sup>. Cela suggère que Grierson maintient l'attribution des monnaies de ce type à cet empereur, formulée dans son article antérieur. Coupland reprend également les pièces au buste et à la légende METALL GERMAN parmi celles du Type 4 de Charlemagne<sup>305</sup>. Prou 972 a donc été intégré à notre *corpus* de monnaies du Type 4 de Charlemagne, portant le total des exemplaires de ce type à quatre, et attribué à l'atelier de Melle.

## **IV. Louis le Pieux (814-840)**

### **1. Louis le Pieux Type 1 (814-818)**

Pour les monnaies du Type 1 de Louis le Pieux, les nouvelles acquisitions concernent les ateliers de Tours (BnF 445a) et de Sens (BnF 565a).

---

<sup>299</sup> MEC p. 237 et (Coupland, 2005) p. 224.

<sup>300</sup> MEC p. 236.

<sup>301</sup> MEC p. 236-237. METALL est toutefois proche de METALLVM qui apparaît dès 814 sur les premières émissions melloises de Louis le Pieux (Type 1 au buste).

<sup>302</sup> (Téreygeol *et al.*, 2005) p. 54.

<sup>303</sup> (Grierson, 1967) p. 522 et Pl. I n° 24.

<sup>304</sup> MEC p. 209.

<sup>305</sup> (Coupland, 2005) p. 224.

Vingt-trois deniers de la BnF de ce type ont été analysés. Deux exemplaires d'autres collections ont également été inclus dans cette étude afin de contribuer à éclairer une problématique propre aux monnaies de Melle. Ces deux pièces nous ont été confiées par le musée des Mines des rois Francs de Melle et par la Monnaie de Paris.

Les monnaies de Louis le Pieux au buste sont facilement identifiables, et aucune de celles de la collection de la BnF ne pose de problème d'attribution. Celles proposées par Prou pour les pièces du Type 1 de Louis le Pieux sont donc justes.

Parmi les deniers classés au sein de ceux issus d'un atelier indéterminé dans le catalogue des monnaies carolingiennes de la BnF, trois peuvent être attribuées à un lieu d'émission. Les deniers référencés Prou 984, Prou 985 et Prou 986 dont le revers ne porte pas le nom d'une ville mais la légende XPISTIANA RELIGIO, auraient été frappés à l'atelier du Palais à Aix-la-Chapelle<sup>306</sup>.

En plus des deniers, la collection de monnaies carolingiennes de la BnF comporte deux oboles du Type 1 de Louis le Pieux : une de Melle et une de Toulouse. Le total des exemplaires de notre *corpus* pour cette période s'élève donc à vingt-sept.

## **2. Louis le Pieux Type 2 (818-822/3)**

Le *corpus* de deniers du Type 2 de Louis le Pieux de la BnF<sup>307</sup> s'est enrichi des exemplaires suivants depuis la publication du catalogue de Prou : BnF 68a (Dorestad), BnF 115a (Cambrai), BnF 1993-602 (Orléans), BnF 715a (Melle), BnF 734a et BnF 734b (Bourges), BnF 836a (Narbonne) et BnF 943a (« *Aldunheim* »).

BnF 943a porte le nom d'« *Aldunheim* », lieu d'émission dont la localisation précise, probablement en Allemagne, ne peut être établie<sup>308</sup>.

Trois oboles du Type 2 de Louis le Pieux s'ajoutent également à celles recensées par Prou : BnF 1982-64 (Melle), BnF 860a (Arles) et BnF 903a (Pavie).

Des monnaies de la collection du musée Dobrée de Nantes ont été intégrées à notre *corpus* d'analyse afin de pouvoir raisonner sur un nombre de résultats plus

---

<sup>306</sup> Voir *supra* p. 229.

<sup>307</sup> Les monnaies au nom de Venise, du fait du statut particulier de la cité à l'époque carolingienne, ont été dissociées des autres. Sur ces exemplaires voir *infra* p. 283.

<sup>308</sup> (Coupland, 1990) p. 28.

conséquent pour étudier certaines problématiques : les deniers N- 4299, N-4840, et l'obole N-4294, de Melle. Un denier de Pavie issu des fouilles du site de Saint-Marcel (56) a également pu être analysé.

L'ensemble des attributions d'atelier du catalogue de Prou pour les monnaies du Type 2 de Louis le Pieux est juste. Les oboles à la titulature LVDO/VVIC attribuées dans cet ouvrage à la période de règne de Louis sur l'Aquitaine entre 781 et 793/4 ont été ajoutées au *corpus* de monnaies du Type 2 de Louis le Pieux<sup>309</sup>.

La monnaie Prou 46 de Strasbourg classée parmi les monnaies de Louis le Pieux par Prou n'a pas été considérée ici : comme l'avait remarqué l'auteur du Catalogue des monnaies carolingiennes de la Bibliothèque nationale, le style de cette monnaie ne correspond pas aux deniers de Louis le Pieux<sup>310</sup>. Ou bien peut-être s'agit-il d'un faux<sup>311</sup>.

Soixante-seize deniers, en dehors de ceux de Venise, et vingt-trois oboles, constituent notre *corpus* pour le Type 2 de Louis le Pieux et la période 818-822/3.

### 3. Louis le Pieux Type 3 (822/3-840)

Contrairement aux types précédents depuis Pépin le Bref jusqu'au Type 2 de Louis le Pieux, pour lesquels l'intégralité des monnaies de la BnF a été analysée, seuls des exemplaires choisis afin de répondre à des problématiques spécifiques ont été étudiés dans le cadre de cette thèse pour le Type 3 de Louis le Pieux. La prise en compte de l'ensemble des deniers de ce type est en effet difficilement envisageable si l'on considère le nombre déjà conséquent de pièces correspondant à ceux qui ont été analysés intégralement. Ce choix a été également motivé par l'absence de certitude sur l'origine des monnaies considérées. L'étude de différences géographiques dans la composition des pièces du Type 3 de Louis le Pieux se trouvait en effet entravée par l'absence de mention du nom de l'atelier émetteur sur leur revers. Quelques exemplaires ont toutefois été considérés afin d'en évaluer le titre global, ainsi que pour étudier la poursuite de certaines

---

<sup>309</sup> Voir *supra* n. 274 sur ces monnaies dans le paragraphe sur le *corpus* de Louis roi d'Aquitaine.

<sup>310</sup> Voir Prou dans la description de Prou 46 p. 8 : « *Par son style, ce denier accuse une époque postérieure au règne de Louis le Pieux.* » .

<sup>311</sup> L'analyse de cette monnaie a révélé un titre de 54,0 % d'argent seulement. Il peut donc s'agir d'un faux ou d'une monnaie d'une période plus tardive durant laquelle le standard d'argent n'était pas aussi élevé que sous Louis le Pieux.

particularités de composition observées pour le type précédent, en s'appuyant sur la classification de ces monnaies proposée par Coupland.

Seize deniers du Type 3 de Louis le Pieux ont ainsi été analysés, en dehors de ceux attribuables à Venise.

Les oboles du Type 3 de Louis le Pieux n'ont pas été intégrées au *corpus* des monnaies carolingiennes analysées dans le cadre de cette thèse.

## **V. Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine (817-838)**

Le seul denier de notre *corpus* attribuable à Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine est, si l'on en croit Coupland, Prou 665<sup>312</sup>. Il s'agit d'un denier au buste et au temple au nom d'Aquitaine.

Prou 735, attribué à Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine dans le Catalogue des monnaies carolingiennes de la BnF, doit en réalité revenir à Charles le Chauve<sup>313</sup>.

## **VI. Pépin II d'Aquitaine (839-852)**

Parmi les types monétaires attribués à Pépin II d'Aquitaine, quatre sont représentés dans notre *corpus*. Douze deniers et deux oboles sont du type au monogramme pippinide, huit oboles au nom d'atelier dans le champ au revers, un denier et une obole avec la légende inscrite en cercle autour d'une croix au droit comme au revers, et un denier avec un temple et une légende chrétienne au revers. Le denier de ce dernier type sans nom de lieu d'émission Prou 1056 pourrait être attribué à l'atelier de Melle selon Coupland<sup>314</sup>.

Ce sont au total vingt-cinq pièces attribuées à Pépin II d'Aquitaine qui ont été analysées, parmi lesquelles quatre acquisitions postérieures au Catalogue de Prou : BnF 690a de Melle, et BnF 809a, BnF 809b et BnF 1993-605 de Toulouse.

## **VII. Lothaire (840-855)**

Des monnaies des trois types connus au nom de Lothaire ont été analysées : au buste et à la légende chrétienne, à la croix et au temple, et à la croix et au nom d'atelier dans le champ.

---

<sup>312</sup> (Coupland, 1989) p. 197.

<sup>313</sup> L'analyse a de plus confirmé les suspicions de faux émises par certains auteurs au sujet de cet exemplaire. Voir *infra* p. 304.

<sup>314</sup> (Coupland, 1989) p. 207-208.

Selon le classement des monnaies au buste de Lothaire proposé par Coupland, les trois deniers de la BnF qui ont pu être étudiés seraient du Palais (Prou 1048), de Metz (Prou 1049) et de Pavie (Prou 1050)<sup>315</sup>. Coupland date ces monnaies au portrait du couronnement de Lothaire roi d'Italie en 823<sup>316</sup>.

Aucune des pièces du *corpus* des échantillons analysés ne fait partie du groupe de celles à la titulature HLOTHARIVS AGVS qui auraient été frappée durant la révolte de 833.

Quatorze deniers au temple et à la croix font partie de notre *corpus*. Quatre d'entre eux présentent une légende du type XPISTIANA RELIGIO et ne portent pas la mention de l'atelier émetteur. Si l'on se fonde sur la classification de Coupland pour les monnaies de ce type, Prou 1051 serait d'un atelier indéterminé<sup>317</sup>, Prou 1052 peut-être de Verdun, et Prou 1053 et Prou 1054 de Lyon<sup>318</sup>. Ces attributions qui méritent confirmation n'ont pas été retenues pour le classement dans notre catalogue. Les monnaies au temple qui portent un nom d'atelier proviennent de villes localisées dans la partie nord du territoire de Lothaire, à l'exception d'une monnaie au nom de Bordeaux<sup>319</sup>.

Sept deniers de Lothaire au nom d'atelier dans le champ au revers font partie de notre *corpus*<sup>320</sup>. Cinq d'entre eux sont de Dorestad, les deux autres d'ateliers italiens.

Selon les indications qui apparaissent dans les notices des exemplaires référencés 1.818, 1.819 et 1.820 dans MEC, les deniers de Dorestad au nom de Lothaire peuvent être classés ainsi : Prou 69 et Prou 70 seraient des émissions officielles ; Prou 71 à Prou 73 seraient des imitations frisonnes ; Prou 74 à Prou 78 pourraient en être également. Rappelons toutefois que Coupland réfute l'hypothèse de la frappe de monnaies d'imitation aux noms de Lothaire et de Dorestad : toutes les pièces seraient, selon lui, officielles<sup>321</sup>. Les imitations supposées ou soupçonnées par Grierson et Blackburn n'ont pas été dissociées dans notre

---

<sup>315</sup> (Coupland, 1988b) p. 46 et (Coupland, 2001) p. 161.

<sup>316</sup> (Coupland, 2001) p. 160.

<sup>317</sup> Il s'agit bien de Prou 1051 que Coupland affecte au groupe qui pourrait être issu de Verdun comme cela apparaît dans son texte p. 190, et non de Prou 1053 comme il le mentionne dans la description des planches p. 195 pour la monnaie référencée 78. Voir (Coupland, 2001). La comparaison de la photographie du n° 78 qui apparaît sur la Planche 39 avec la description de Prou 1051 dans le catalogue de Prou lève toute ambiguïté.

<sup>318</sup> Voir (Coupland, 2001) p. 185 n. 107.

<sup>319</sup> Sur les émissions au nom de Lothaire en Aquitaine voir *supra* p. 245.

<sup>320</sup> Une huitième monnaie au nom de Lothaire de ce type a également été analysée mais sa description a été dissociée : il s'agit d'un exemplaire au nom de Venise. Voir *infra* p. 283.

<sup>321</sup> (Coupland, 2001) p. 174.

catalogue, mais leurs suspicions ont été considérées lors de l'interprétation des résultats analytiques de ces échantillons.

La collection de la BnF s'est enrichie d'une obole de Lothaire au nom d'Aquitaine (BnF 658a). Il s'agit de l'unique obole de ce souverain au sein de notre *corpus*.

Vingt-quatre deniers et une obole au nom de Lothaire ont été analysés, à l'exception de l'exemplaire de Venise qui est dissocié des autres.

## **VIII. Charles le Chauve (840-877)**

Seules quelques monnaies de Charles le Chauve antérieures et postérieures à l'édit de Pîtres ont été analysées, afin d'évaluer l'évolution du titre des deniers durant le règne de ce souverain et dans le but d'étudier des problématiques liées à l'attribution de certaines monnaies à Charlemagne ou à Charles le Chauve.

Les monnaies de Charles le Chauve de notre *corpus* sont séparées ainsi : les exemplaires dont l'émission est antérieure à l'édit de Pîtres (840-864) ; ceux postérieurs à cette date (864-877) ; les pièces au monogramme carolin dont l'émission peut dater de l'ensemble du règne de Charles le Chauve (840-877).

Quelques monnaies de Charles le Chauve à la titulature impériale frappées en 876 et 877 ont également été étudiées.

Certaines des monnaies de Melle et de Bourges au monogramme carolin, qui peuvent être du Type 3 de Charlemagne ou de la Première ou Deuxième Période d'émission de Charles le Chauve, sont présentées plus loin<sup>322</sup>.

### **1. Charles le Chauve Première période (840-864)**

La typologie définie par Grierson et Blackburn dans MEC et présentée plus haut distingue cinq types monétaires pour les émissions de Charles le Chauve antérieures à l'édit de Pîtres de 864<sup>323</sup>. Cette typologie a été utilisée prioritairement au classement régional de Prou pour notre catalogue. Les monnaies apparaissent dans le même ordre que les types monétaires décrits, à l'exception du troisième pour lequel aucun exemplaire n'a été étudié (porte de ville au revers), et du quatrième au monogramme carolin dont les exemplaires peuvent avoir été frappés durant l'ensemble du règne de Charles le Chauve : nom d'atelier dans le champ, puis buste, et enfin temple.

---

<sup>322</sup> Voir *infra* p. 279.

<sup>323</sup> MEC p. 231. Voir *supra* p. 247.

Les deniers de Charles le Chauve de notre *corpus* dont la frappe est assurément antérieure à l'édit de Pîtres sont au nombre de douze. Ils se répartissent entre les types MEC 1a au nom d'atelier dans le champ (quatre exemplaires), 1b au buste (trois) et 1e au temple (cinq). Le denier Prou 735 attribué à Charles le Chauve et classé parmi les monnaies du type au buste de ce souverain (MEC 1b) n'est pas de Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine comme cela apparaît dans Prou<sup>324</sup>.

Sept oboles correspondant aux deniers du Type MEC 1e ont également été analysées.

## **2. Charles le Chauve Deuxième période (864-877)**

Les analyses de deniers de Charles le Chauve du Type GDR ont pour seule finalité d'évaluer le titre des deniers de ce type et l'efficacité de la réforme. Seuls cinq deniers postérieurs à 864 ont été inclus dans notre *corpus* d'analyse, l'un de Maastricht et l'autre de Tours.

## **3. Les monnaies impériales de Charles le Chauve (876-877)**

Deux exemplaires de Charles le Chauve frappés durant la courte période d'émission de pièces à la titulature impériale ont été analysés. Il s'agit des deux oboles Prou 745 et Prou 746 de Bourges.

## **4. Les monnaies de Charles le Chauve au monogramme carolin (840-877)**

Certaines des monnaies au monogramme carolin analysées peuvent être rapprochées du règne de Charles le Chauve plutôt que de celui de Charlemagne. Tous les exemplaires de Beauvais (quatre deniers) et de Clermont (deux deniers et quatre oboles) sont indiscutablement de Charles le Chauve. Les trésors contenant de tels exemplaires les rapprochent de plus de la Deuxième période d'émission de Charles le Chauve, après 864<sup>325</sup>.

Pour Bourges, Melle et Toulouse, de tels exemplaires sont connus pour les deux souverains. L'étude numismatique seule permet de différencier les pièces au monogramme carolin de Charlemagne de celles de Charles le Chauve pour Bourges et Toulouse ; pour Melle, certains exemplaires peuvent être rapprochés du règne de Charles le Chauve sur la base de caractéristiques numismatiques, tandis que

---

<sup>324</sup> (Coupland, 1989) p. 211. La légende du droit de cette monnaie, très peu lisible, est interprétée comme une dégénérescence de la titulature royale de Charles et non celle de Pépin comme l'a lu Prou. L'analyse a révélé qu'il s'agit d'un faux comme l'avait suggéré Coupland. Voir *infra* p. 304.

<sup>325</sup> Des deniers au monogramme carolin de ces deux ateliers sont en effet répertoriés dans des trésors constitués majoritairement de pièces du Type GDR : Glisy et Arras pour Beauvais, et Arras, Avignon, Bourgneuf, Yronde, Moulin-Gargot et Gannat pour Clermont.



l'attribution à un souverain est impossible pour les autres. Au sein du *corpus* de monnaies carolingiennes au monogramme carolin de la BnF, cinq deniers et quatre oboles de Melle ont été analysés, ainsi que trois deniers et une obole de Bourges, et quatorze deniers et une obole de Toulouse<sup>326</sup>.

### **IX. Les monnaies au monogramme carolin de période d'attribution incertaine**

Le cas des monnaies de certains ateliers d'Aquitaine doit être étudié spécifiquement afin de définir quels sont les exemplaires qui peuvent être associés à Charlemagne, à Charles le Chauve, et ceux pour lesquels les connaissances actuelles sont insuffisantes pour proposer une attribution. Selon Coupland, les ateliers pour lesquels des deniers de ce type auraient été frappés par les deux souverains sont les suivants : Melle, Bourges et Toulouse<sup>327</sup>.

Pour les monnaies de Melle au monogramme carolin, Prou associe l'exemplaire répertorié 688 à Charlemagne, et les deniers et oboles 692 à 708 à Charles le Chauve, sur des critères stylistiques semble-t-il. Parmi l'ensemble de ces pièces, certaines portent une croix caractéristique, dans la légende du revers METVLLLO pour les deniers (+ ou X entre le T et le V), et à côté du monogramme au droit pour les oboles<sup>328</sup>. L'étude des trésors semble montrer que les monnaies qui présentent cette croix ont été frappées durant le règne de Charles le Chauve uniquement ; celles qui ne portent pas cette marque peuvent, quant à elles, dater du règne de Charlemagne ou de celui de Charles le Chauve, sans qu'aucun critère numismatique ne permette de différencier les exemplaires des deux souverains. Des différences de style existent entre certaines de ces monnaies, mais cela est insuffisant pour attribuer avec certitude chacune à une période ou une autre.

Ces informations permettent de classer les monnaies de Melle au monogramme carolin de notre *corpus* ainsi : les deniers et oboles à la croix Prou 699, Prou 700, Prou 701, BnF 705a, Prou 706, Prou 707 et Prou 708 sont attribués à Charles le Chauve ; leur émission est supposée commencer en 840 au plus tôt, et elle pourrait s'être poursuivie après la mort de ce souverain en 877<sup>329</sup>.

---

<sup>326</sup> Voir le paragraphe suivant pour la justification de ces attributions.

<sup>327</sup> Voir (Coupland, 2005) p. 219-220.

<sup>328</sup> Grierson et Blackburn suggèrent une frappe des monnaies qui portent cette croix à Poitiers et non à Melle. Voir MEC p. 238.

<sup>329</sup> Cette hypothèse s'appuie sur les trouvailles monétaires datées du début du X<sup>e</sup> siècle comme celle de Cuerdale (Lancastre, Angleterre) dont l'enfouissement serait de 905 environ et qui contenait des deniers mellois au monogramme carolin. L'absence de monnaies melloises de Charles le Chauve à la titulature impériale suggère de plus que les pièces frappées à Melle entre 875 et 877 portent la

Les autres monnaies Prou 688, Prou 692, Prou 693, Prou 694, Prou 695, Prou 696, Prou 697, Prou 698, BnF 698a, BnF 698b, Prou 703, BnF 703a, Prou 704 et Prou 705, n'ont pas été attribuées, et apparaissent dans la partie de notre catalogue « Monnaies au monogramme carolin de période d'émission incertaine ».

Le cas des exemplaires Prou 702 et BnF 1996-115 est particulier et mérite d'être traité séparément. Le premier de ces deux deniers présente une légende CARLVSREXP au droit, et au revers METVLLO sans croix autour d'un monogramme peu lisible, qui peut aussi bien être carolin que pippinide. La titulature qui apparaît sur le droit du second est CARLVSREF, et le nom d'atelier autour du monogramme carolin est METVLLO, sans croix caractéristique dans la légende également. Ces deux deniers doivent être classés parmi les exemplaires attribuables à Charles le Chauve : bien que la croix caractéristique qui permet d'attribuer certains deniers mellois au monogramme carolin à Charlemagne ou à Charles le Chauve n'y apparaisse pas dans le nom d'atelier au revers, les titulatures incomplètes CARLVSREXP et CARLVSREF sont caractéristiques du plus tardif de ces deux souverains.

Les attributions des monnaies de Toulouse au monogramme carolin dans Prou semblent être justes d'après les connaissances actuelles sur les monnaies de ce type. Pour les ateliers ayant frappé des pièces au monogramme sous Charlemagne et Charles le Chauve, les associations de Prou sont semble-t-il basées sur des critères stylistiques qui n'ont pas de fondement historique avéré. Ces considérations stylistiques coïncident toutefois avec des variétés de légende pour les monnaies de Bourges et de Toulouse : les exemplaires pour lesquels la légende du revers est suivie de CIVI (pour *civitas*, cité) ont été attribués à Charles le Chauve, et ceux qui présentent le nom de la ville seul à Charlemagne. Bien que les raisons des attributions de Prou pour les monnaies toulousaines au monogramme soient discutées par Grierson, les associations resteraient selon lui valables<sup>330</sup>.

Les attributions suivantes ont ainsi été effectuées pour Toulouse : Prou 800, Prou 801 et Prou 802, à la légende TOLVSA au revers, ont été associés à

---

titulature royale, malgré le titre d'empereur reçu par Charles : l'hypothèse d'un arrêt de la frappe dans cet atelier durant les brèves années d'émission de ce type paraît peu vraisemblable.

<sup>330</sup> (Grierson, 1967) p. 503 n. 13 : « *But in some cases not entirely so* [la distinction des deniers au monogramme carolin de Charlemagne et de Charles le Chauve pour les ateliers d'Aquitaine tient de la divination]. *G. PIERFITTE has shown that while PROU's ascription to Charlemagne of only those coins of Toulouse with the spelling Tolusa is incorrect and based on faulty premises, a satisfactory separation, which coincides with clearly marked stylistic differences, can be made by giving to Charlemagne all coins with the mint name alone and to Charles the Bald those on which this is accompanied by civi (Numismatique Toulousaine. Les monnaies de Charlemagne et de Charles le Chauve. [RN4, 36, 1933], pp. 149-54. It seems that the same distinction holds good for other mints.* »

Charlemagne ; Prou 813 à Prou 817, dont la légende du revers est du type TOLOSA CIVI, attribués à Charles le Chauve. Les acquisitions de monnaies au monogramme carolin attribuables à Charles le Chauve issues de l'atelier de Toulouse qui ne figurent pas dans le Catalogue des monnaies carolingiennes de Prou sont BnF 813a, BnF 813b, BnF 813c, BnF 814a, BnF 814b, BnF 814c, BnF 814d, BnF 814e, BnF 814f et BnF 814g. Au total, vingt-huit deniers et neuf oboles au monogramme des années 840-877 issues de cet atelier ont été analysées.

L'attribution individuelle de chaque exemplaire au monogramme carolin à Charlemagne ou à Charles le Chauve sur la base de critères numismatiques n'est semble-t-il valable que pour le seul atelier de Toulouse : Coupland indique en effet que des exemplaires de ce type identiques auraient été frappés à Melle et à Bourges sous les deux souverains<sup>331</sup>. Si cela est vrai pour certains exemplaires de Melle<sup>332</sup>, l'étude des trésors montre que des différences dans l'écriture du nom d'atelier et de la titulature royale permettent de discerner la plupart des monnaies au monogramme carolin berruyères de Charlemagne de celles de Charles le Chauve. Les deniers à la titulature CARLVSREXFR et à la légende BITVRICAS au revers sont tous issus de trésors de l'époque de Charlemagne d'après les recueils<sup>333</sup> : deux exemplaires à Biebrich, et un à Château-Roussillon<sup>334</sup>. Les deniers dont la titulature au droit est CARLVSREX (sans FR), et le nom d'atelier au revers BITVRICES CIVI, proviennent quant à eux de trésors à rapprocher indiscutablement de Charles le Chauve : Chaumoux-Marcilly, Fontaines-Mercurey, Cosne-sur-Loire, Gannat, Moulin-Gargot et Montrieux-Courbant. Un troisième type de denier, référencé par MG (ref. 175), présente une titulature CARLVSREX et un nom de lieu d'émission BITVRICAS. Aucun trésor qui permettrait de dater les exemplaires de ce type n'est recensé dans la littérature, aussi leur période d'émission demeure incertaine. Il semble toutefois qu'une attribution à Charles le Chauve soit plus probable : il n'existe en effet, à notre connaissance, aucun denier daté de l'époque de Charlemagne dont la titulature au droit est CARLVSREX, sans FR. C'est donc cette caractéristique qui semble à nos yeux prévaloir sur celle de l'écriture du nom de lieu d'émission, avec ou sans CIVI.

---

<sup>331</sup> (Coupland, 1991) p. 125.

<sup>332</sup> Voir *supra* p. 279.

<sup>333</sup> Haertle, Völckers et Duplessy. Voir les références de ces ouvrages *supra* p. 189.

<sup>334</sup> L'attribution à Charlemagne des pièces au monogramme carolin du trésor de Biebrich ne fait aucun doute. Voir *supra* p. 225 n. 102 pour ce premier trésor. Pour celui de Château-Roussillon (66), l'attribution de l'ensemble des exemplaires au monogramme carolin à Charlemagne est possible du fait de la présence d'exemplaires de Pavie et de Dorestad. Ainsi, le denier de Bourges à la légende BITVRICAS, celui de Toulouse avec TOLVSA, et le denier et l'obole de Melle sans croix caractéristique confirment que de tels exemplaires ont été frappés sous Charlemagne.

Deux types d'oboles au monogramme carolin sont connues pour l'atelier de Bourges : celles du premier groupe portent au droit le monogramme dans le champ, et le nom de l'atelier émetteur inscrit autour d'une croix au revers ; aucune trouvaille ne permet de rapprocher les oboles de ce type à Charlemagne ou à Charles le Chauve. Elles peuvent en conséquence avoir été frappées par l'un des deux souverains seulement, ou par les deux. Les oboles du deuxième groupe reprennent les types de droit et de revers des deniers les plus abondants sous Charles le Chauve : CARLVSREX autour d'une croix au droit, et BITVRICES CIVI autour du monogramme au revers. Leur similarité typologique avec les deniers de Bourges attribués à Charles le Chauve, et leur présence de telles pièces dans les trésors de Chaumoux-Marcilly, Moulin-Gargot et Cosne-sur-Loire, les rapproche indiscutablement de ce souverain.

Les monnaies de notre *corpus* d'analyse de Bourges au monogramme carolin ont donc été attribuées comme suit : les deniers Prou 728 à Prou 732 à Charlemagne, les deniers Prou 739, Prou 740 et Prou 742, ainsi que l'obole Prou 741, à Charles le Chauve. Aucune n'apparaît dans la section des exemplaires au monogramme carolin de période d'émission incertaine.

Le cas des deniers Prou 798 et Prou 799 que Prou attribue à Dax a été discuté plus haut<sup>335</sup> ; leur émission daterait probablement de l'époque Charlemagne, c'est donc à ce souverain que ces exemplaires ont été rattachés.

Les monnaies au monogramme carolin d'Agen doivent être considérées ici. Prou attribue à Charlemagne la pièce Prou 791 dont la légende du revers est AGIN CIVITAS, et Prou 792 à Prou 795 qui portent une légende du type AGINNO, à « Charles le Chauve, roi (840-855), ou Charles l'Enfant (855-866) ». L'étude des trésors effectuée par Coupland semble montrer que l'atelier d'Agen n'a émis des monnaies au monogramme carolin que durant le règne de Charlemagne<sup>336</sup>. L'ensemble des pièces de ce type au nom d'Agen, quelles qu'en soient les légendes, et les deniers comme les oboles, ont en conséquence été classés parmi les émissions de Charlemagne du Type 3.

Le cas des oboles de Melle au monogramme a été discuté plus haut avec celui des deniers issus du même atelier de frappe : les exemplaires pour lesquels une croix est inscrite sous le K du monogramme sont de Charles le Chauve, et ceux

---

<sup>335</sup> Voir *supra* p. 268.

<sup>336</sup> (Coupland, 2005) p. 219 et (Coupland, 1991) p. 125, en particulier du fait de la présence d'un exemplaire de chacun de ces deux types dans le trésor de Biebrich, daté du règne de Charlemagne.

qui ne présentent pas cette caractéristique ne peuvent être attribués à Charlemagne ou à Charles le Chauve. Les oboles sur lesquelles le monogramme ne remplit pas le champ du droit mais apparaît au revers au centre du nom d'atelier en cercle (comme Prou 741 de Bourges ou Prou 815 de Toulouse) sont d'après les trésors uniquement de l'époque de Charles le Chauve.

Huit oboles au monogramme carolin dans le champ ont été analysées : toutes sont de l'atelier de Melle. Quatre parmi elles sont de Charles le Chauve et quatre de ce souverain ou de Charlemagne.

## **X. Les monnaies vénitiennes frappées au type carolingien**

### **1. Les monnaies vénitiennes du Type 2 de Louis le Pieux (818-822/3)**

Le *corpus* des monnaies du Type 2 de Louis le Pieux au nom de Venise s'est très largement enrichi depuis la publication du catalogue de Prou. Sept nouvelles acquisitions de monnaies de ce type viennent s'ajouter aux quatre deniers recensés par Prou : BnF 920a à BnF 920f, à la légende +VEN/ECIAS en deux lignes au revers, et BnF 1982-63, au nom d'atelier +VENE/CIASMO/NETA en trois lignes. Un denier vénitien du Type 2 de Louis le Pieux prêté par le musée Dobrée de Nantes a également été analysé (N-4300).

Ce sont ainsi douze de ces pièces qui font partie de notre *corpus*, faisant de Venise l'atelier le plus représenté pour les deniers de la période 818-822/3.

### **2. Les monnaies supposées vénitiennes du Type 3 de Louis le Pieux (822/3-840)**

Cinq des vingt-et-une monnaies du Type 3 de Louis le Pieux de notre *corpus* sont attribuables à Venise selon les critères définis par Coupland.

### **3. Le Type *Xpe Salva Venecias* (822/3-840 ?)**

Aucune monnaie vénitienne à la légende XPE SALVA VENECIAS ne figure dans le catalogue constitué par Prou. L'acquisition des exemplaires BnF 920g et BnF 920h a permis d'analyser deux monnaies de ce type afin d'en estimer la composition.

### **4. Les monnaies vénitiennes au nom de Lothaire (840-855)**

Une monnaie vénitienne au nom de Lothaire figure au sein de la collection nationale française (Prou 921). Elle a donc été intégrée au *corpus* d'analyse.

Aucun des deniers de Lothaire au temple et à la légende chrétienne que Coupland attribue à Venise sur la base de critères stylistique n'a été identifié dans

la collection de la BnF. Les monnaies de ce type n'ont donc pu être intégrées à notre *corpus*. Les seules pièces identifiées seraient pour l'essentiel issues du trésor de Roermond, auxquelles s'ajouteraient deux exemplaires au British Museum de Londres (BM 90 et BM 91)<sup>337</sup>.

## **XI. Les émissions d'or**

Les analyses de monnaies carolingiennes effectuées dans le cadre de cette thèse portent exclusivement sur les alliages d'argent. Ceux-ci constituent en effet l'extrême majorité des espèces émises et en circulation. Les monnaies d'or sont très rares et peu représentatives de la circulation monétaire sous les premiers carolingiens. Ces monnaies n'ont donc pas été intégrées à notre *corpus* d'analyse, bien que la collection de la BnF en rassemble quelques exemplaires.

## **E. De la représentativité du *corpus* des monnaies analysées**

La question de la représentativité du *corpus* des monnaies carolingiennes analysées dans le cadre de cette thèse doit être abordée : la fiabilité de l'interprétation historique qui sera déduite des résultats analytiques en dépend.

Deux aspects peuvent être considérés : la représentativité du nombre de monnaies analysées par rapport à l'ensemble de la circulation monétaire de l'époque, et la quantité d'analyses qui permet d'obtenir des données statistiques pour l'étude d'une problématique précise.

La question du nombre de monnaies en circulation pour les différentes périodes d'émission de l'époque carolingienne semble insoluble tant les incertitudes qui caractérisent chaque paramètre sont importantes. Aucun texte relatif au volume des émissions monétaires n'est connu pour la période qui nous intéresse. L'estimation du nombre de monnaies en circulation ne peut donc reposer que sur l'étude des exemplaires mis au jour dans les trésors. Mais ici encore, les incertitudes qui entourent les variables à prendre en compte sont colossales : le nombre de monnaies recensées pour chaque période d'émission n'est pas nécessairement, et même pas vraisemblablement, directement proportionnel à celui des pièces en circulation lorsqu'elles avaient cours. Le caractère aléatoire des découvertes de trésors, ainsi que le contexte politique ou l'insécurité variable selon les régions et les périodes, compliquent l'estimation des rapports entre ces deux valeurs. Si l'on considère la seule variable du nombre de monnaies frappées en utilisant un seul coin, les facteurs qui apparaissent entre les différentes estimations permettent de prendre la mesure des incertitudes de calculs basés sur cette donnée :

---

<sup>337</sup> (Coupland, 2001) p. 187.

les valeurs regroupées par Bompaire et Dumas oscillent entre 5000 et 70000 frappes à l'aide d'un même coin pour des émissions du bas Moyen Age, soit un facteur quatorze entre l'estimation la plus modeste et la plus optimiste<sup>338</sup>. Pour la période carolingienne, ce type d'étude est d'autant plus délicat que les liaisons de coins sont extrêmement rares. Chacun des modèles de calcul qui reposent sur des liaisons de coins constitue une démonstration que ces estimations sont vouées à l'échec pour le monnayage carolingien<sup>339</sup>. Le nombre précis de pièces frappées pour un type monétaire donné, ou en circulation pour un territoire défini et à un moment choisi, ne peut être déterminé, ni même estimé. La variété des coins utilisés et le nombre d'ateliers peuvent tout au plus suggérer que le nombre de monnaies en circulation à l'époque carolingienne se comptait au moins en millions<sup>340</sup>. Bompaire et Dumas rapportent que les évaluations proposées pour la période carolingienne « *de 6 millions à 40, voire 120 millions de pièces, laissent perplexes sur la fiabilité d'une telle entreprise pour la période carolingienne.*<sup>341</sup> ». De ce point de vue donc, les quelque quatre cents monnaies de notre *corpus* d'analyse peuvent sembler peu représentatives.

La réalité de l'analyse de monnaies anciennes est cependant toute autre. L'expérience acquise à partir de programmes d'analyses antérieurs et dans le cadre de cette thèse le montre : l'analyse d'une vingtaine de monnaies semble suffisante pour obtenir des résultats représentatifs pour l'étude d'une problématique précise. Pour l'évolution du titre des pièces carolingiennes, les types monétaires étudiés de manière exhaustive pour lesquels le nombre d'échantillons peut être considéré comme insuffisant sont : Charlemagne Type 1 (7 exemplaires) ; Carloman (2) ; Louis, roi d'Aquitaine (3) ; Charlemagne Type 4 (4) ; Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine (1) ; *Xpe Salva Venecias* (2). Ces types constituent des émissions particulières que l'on peut considérer pour deux d'entre elles comme commémoratives ou de prestige, et qui toutes ne semblent pas avoir formé la majeure partie du numéraire dans leur aire de circulation à un moment précis. Pour ces échantillons, les résultats auront donc une valeur seulement indicative. Les compositions déterminées n'en demeureront pas moins des informations précieuses car nos analyses sont les premières pour les monnaies de ces types. Pour les autres types monétaires, le nombre d'exemplaires analysés est au pire simplement suffisant (Pépin le Bref : 26 deniers) ou au mieux largement représentatif (Louis le Pieux Type 2 : 100 monnaies). Du point de vue de la vision générale du monnayage carolingien, et de

---

<sup>338</sup> (Bompaire et Dumas, 2000) p. 530.

<sup>339</sup> Les plus simples de ces modèles sont repris dans (Bompaire et Dumas, 2000) p. 529.

<sup>340</sup> (Metcalf, 1972) p. 406, ou (Bruand, 2002) p. 165.

<sup>341</sup> (Bompaire et Dumas, 2000) p. 124.

l'évolution de sa pureté au cours de la période étudiée, notre échantillonnage peut donc être considéré comme représentatif.

C'est davantage lors de l'étude de particularités régionales ou locales, ou de spécificités de monnaies d'un sous-type différent, que notre *corpus* s'est parfois révélé limité. La comparaison des titres des oboles par rapport aux deniers est plus indicative que représentative : pour le Type 2 de Charlemagne par exemple, ce sont seulement trois oboles qui ont pu être analysées contre plus de quatre-vingts deniers. Pour nombre de problématiques précises, l'analyse d'un nombre représentatif de monnaies de chaque type, sous-type ou atelier différent n'est pas envisageable. Les contraintes temporelles et financières ne sont pas les seules à limiter les possibilités d'analyse de monnaies carolingiennes : le facteur principal, et qui constitue une limitation qui ne peut être dépassée, est le nombre des exemplaires connus à ce jour.

Morrison estimait en 1963 le nombre de monnaies connues pour l'ensemble de la période carolingienne, soit entre le milieu du VIII<sup>e</sup> siècle et la fin du X<sup>e</sup> siècle, à une valeur comprise entre 5000 et 8000<sup>342</sup>. La découverte de trésors depuis l'estimation de Morrison porte peut-être cette valeur à 10000 ou 15000 exemplaires. Parmi ces monnaies, seule une fraction date de la période qui nous intéresse. Ce sont donc quelques milliers de pièces seulement pour Pépin le Bref, Carloman, Charlemagne, Louis le Pieux, Pépin I<sup>er</sup> et Pépin II d'Aquitaine, Lothaire et pour la première partie du règne de Charles le Chauve, qui sont réparties dans les collections modernes. L'analyse de plus de quatre cents monnaies, si elle peut sembler de prime abord peu représentative de l'ensemble du numéraire d'une période qui s'étend de 751 avec l'avènement de Pépin le Bref à l'édit de Pîtres de 864, constitue donc une contribution majeure pour la compréhension de la frappe et de la circulation monétaires durant ces années. Il est indiscutable que des lacunes énormes sont comblées par ce programme d'analyse dont les avantages ont été présentés plus haut : la méthode employée est à l'heure actuelle la plus précise pour déterminer le titre des monnaies comme pour doser les éléments mineurs et traces pour l'étude de la provenance des métaux précieux ; l'unité de méthode et d'analyse permet de plus de comparer entre eux ces résultats avec confiance.

## **F. Les analyses antérieures**

Si chacun reconnaît l'intérêt d'entreprendre des analyses de monnaies carolingiennes, force est de constater que les résultats disponibles dans la littérature

---

<sup>342</sup> (Morrison, 1963) p. 408.



sont le plus souvent trop rares pour permettre de les incorporer à une réflexion générale sur l'économie de cette période. Ils sont de plus obtenus par des méthodes et des groupes de recherche différents, ce qui exclut la possibilité d'avoir une réflexion d'ordre général. Le faible nombre d'analyses peut induire des interprétations qui ne reflètent pas la réalité de la frappe monétaire et qui seront reprises par les numismates.

Il est par exemple courant de lire que la réforme de Charlemagne de 793/4 a eu pour effet d'améliorer la pureté des monnaies d'argent<sup>343</sup>. La réalité des analyses publiées doit pourtant nuancer cette affirmation : le nombre de résultats pour les monnaies de Charlemagne antérieures à la réforme est certes relativement important<sup>344</sup>, mais celui des analyses de pièces frappées après cette réforme est très restreint : sept compositions seulement sont disponibles dans la littérature, et dans trois publications différentes. Parmi ces sept compositions, deux ont été obtenues suite à une analyse chimique destructive qui ne fournit que le titre d'argent des monnaies. L'auteur de la publication de deux autres, obtenues par une méthode d'analyse de surface, a plus tard estimé que les chiffres proposés antérieurement « *may overstate the case slightly*<sup>345</sup> ». Metcalf reconnaît ici que l'enrichissement de surface a été négligé et que les teneurs en argent publiées sont plus élevées que le titre réel des monnaies.

L'exemple des pièces du Type 3 de Charlemagne a été repris ici tant il nous semble symptomatique des analyses de composition de monnaies carolingiennes : d'une manière générale, les publications de résultats sont de très faible ampleur et peu lisibles. Les tentatives de Metcalf par exemple sont certes louables mais difficilement exploitables : la publication principale par cet auteur d'analyses de monnaies des VIII<sup>e</sup> et IX<sup>e</sup> siècles contient soixante-treize analyses pour une période de cent ans, et concerne à la fois la France et l'Angleterre. Cela est de toute évidence insuffisant, et l'approche nous semble être inadaptée pour obtenir des résultats fiables et représentatifs qui puissent être interprétés, repris et commentés par les numismates, historiens et spécialistes de l'économie du haut Moyen Age.

## **I. Recensement des analyses antérieures**

Les résultats des analyses antérieures sont présentés chronologiquement en fonction de l'ordre d'émission, depuis Pépin le Bref jusqu'à Charles le Chauve et Lothaire, puis les monnaies vénitiennes qui ont été dissociées. La compilation des

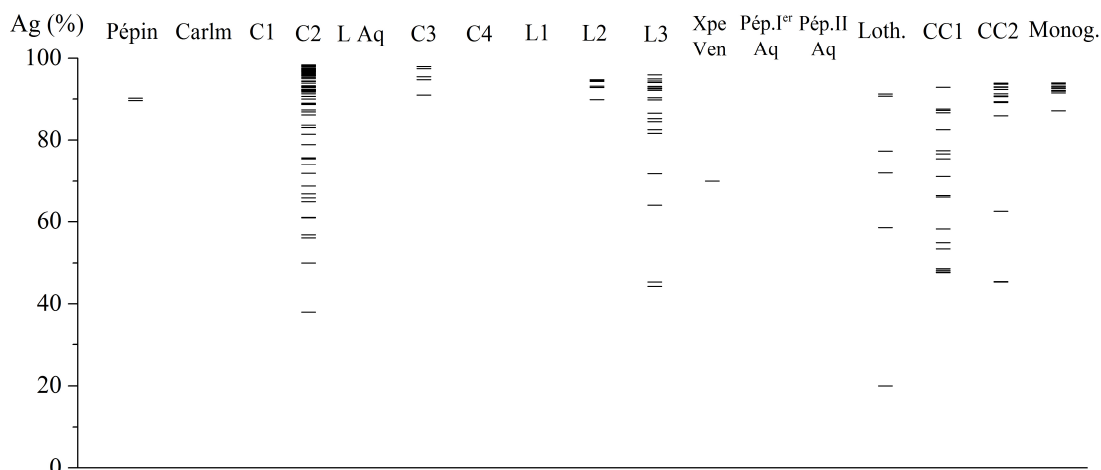
---

<sup>343</sup> Pour n'en citer qu'un voir (Hodges et Whitehouse, 1996) p. 110.

<sup>344</sup> Plus de quatre-vingts à l'heure actuelle, mais les considérations sur l'évolution du titre des deniers de Charlemagne ont pour la plupart été formulées avant que ne paraisse la principale publication d'analyses de pièces de la période 768-793/4.

<sup>345</sup> (Metcalf et Northover, 1989) p. 108.

résultats obtenus par le passé sur des monnaies de types considérés dans le cadre de cette thèse apparaissent dans l'Annexe 4. Les valeurs individuelles de titre des monnaies déterminés sont présentées par type monétaire sur la Figure 110.



**Figure 110** - Evolution du titre d'argent dans les monnaies carolingiennes par type monétaire d'après les analyses antérieures.

Deux résultats d'analyses de monnaies frappées au nom de Pépin le Bref sont disponibles dans la littérature<sup>346</sup>. Ces deux deniers portant les noms de Reims et de Quentovic contiendraient chacun environ 90 % d'argent, ainsi qu'une teneur en or relativement importante, proche de 0,8 % dans les deux cas. Les concentrations en zinc de l'ordre de 0,3 % sont également non négligeables.

Aucune analyse de monnaie de Carloman, ni de denier identifié comme étant du Type 1 de Charlemagne, n'est disponible dans la littérature.

Les résultats des analyses pratiquées sur des deniers de Charlemagne du Type 2 antérieurs à la réforme de 793/4, sont les plus abondants pour la période qui nous intéresse. Relevons en premier lieu les analyses pratiquées par spectrométrie de fluorescence X sur 72 des monnaies constituant le trésor de Pöschendorf-Krinkberg. Les titres déterminés s'échelonnent entre 55 % et 98 % d'argent, pour des deniers provenant pour l'essentiel de Dorestad<sup>347</sup>. En dehors de ce trésor, les teneurs en argent obtenues pour des pièces frappées par Charlemagne entre 771 et 793/4 se divisent en deux groupes : on trouve d'une part des valeurs comprises entre 90 % et 94 % d'argent, obtenues par des méthodes de surface<sup>348</sup> ; d'autre part,

<sup>346</sup> (Metcalf et Northover, 1989) p. 106.

<sup>347</sup> (Ilisch *et al.*, 2003) p. 146-147.

<sup>348</sup> (Metcalf et Merrick, 1967), (Metcalf *et al.*, 1968) p. 38 et 56, (Metcalf et Northover, 1989) p. 106.

des résultats obtenus sur quatre deniers du trésor de Dijon découvert en 1989, contenant pour leur part entre 38 % et 65 % d'argent seulement<sup>349</sup>. Les résultats de Bompaire et d'Ilisch semblent converger pour montrer l'existence d'un grand nombre de monnaies largement affaiblies, ce qui justifierait la réforme de Charlemagne de 793/4. Au contraire, les analyses de Metcalf et ses collaborateurs mettent en évidence un excellent titre des monnaies antérieures à la réforme. Metcalf comme Ilisch ont effectué leurs analyses par spectrométrie de fluorescence X. Le caractère superficiel de cette méthode pose des problèmes quant à l'interprétation des résultats du fait des phénomènes d'enrichissement de surface : pour un même échantillon, des compositions très différentes peuvent être obtenues selon que l'analyse est effectuée sur la tranche ou sur la face, avec ou sans traitement mécanique ou chimique destiné à s'affranchir de la couche de surface perturbée, et selon la nature de ces traitements. Le faible nombre d'analyses effectuées par Metcalf ne permet pas de raisonner sur un nombre représentatif d'analyses qui offrirait d'évaluer le titre moyen des monnaies de Charlemagne antérieures à la réforme ; il ne peut donc être exclu que les échantillons analysés soient effectivement parmi ceux d'un excellent titre. L'interprétation des résultats obtenus par Ilisch est plus complexe. Le nombre important de valeurs de titres supérieures à 95 % pourrait laisser supposer que l'enrichissement en argent de la surface des monnaies n'a pas toujours été éliminé de manière efficace. La proportion importante de titres « faibles » inférieurs à 80 % suggère au contraire que les teneurs en argent n'ont pas été surestimées pour les échantillons concernés.

Aucune analyse de monnaie de Louis roi d'Aquitaine frappée entre 781 et 793/4 n'apparaît dans la littérature.

Pour le Type 3 de Charlemagne au monogramme frappé entre 793/4 et 812, des analyses réalisées au XIX<sup>e</sup> siècle sur des monnaies de la collection de Giovanni Mulazzani ont révélé des titres de près de 95 % pour des deniers italiens<sup>350</sup>. Plus récemment, des titres particulièrement élevés de l'ordre de 98 % ont été détectés lors d'analyses de surface effectuées également sur des monnaies italiennes<sup>351</sup>. Les trois derniers résultats pour des pièces de ce type sont ceux d'Ilisch, qui rapporte

---

<sup>349</sup> (Bompaire et Depierre, 1989) p. 581.

<sup>350</sup> (Mulazzani, 1888) p. 58. Les types des deux deniers de Charlemagne analysés ne sont pas précisés. Il s'agit cependant selon toute vraisemblance de deniers au monogramme puisque l'auteur mentionne le nom de l'atelier émetteur de ces deux pièces italiennes.

<sup>351</sup> (Metcalf *et al.*, 1968), p. 40.

des titres d'argent compris entre 87 % et 95 % d'argent pour des exemplaires de Melle, de Milan et à la légende EX METALLO NOVO<sup>352</sup>.

Aucune analyse n'est disponible pour les deniers impériaux de Charlemagne du Type 4 (812-814) ; les monnaies au buste de Louis le Pieux (Type 1) sont également absentes des publications de compositions de pièces d'argent carolingiennes<sup>353</sup>.

Pour le type suivant de Louis le Pieux (Type 2 frappé entre 818 et 822/3), on relèvera tout d'abord deux analyses chimiques réalisées au XIX<sup>e</sup> siècle sur des deniers de Pavie et Venise, dont les titres sont respectivement 94,4 % et 89,8 %<sup>354</sup>. Metcalf a repris ces analyses et, constatant qu'elles ne révèlent que peu ou pas d'or, conclut que les monnaies italiennes sont plus pauvres en or que les autres<sup>355</sup>. Plus récemment, trois résultats obtenus par une méthode de surface sur des deniers issus d'ateliers situés entre Seine et Rhin ont révélé des titres d'argent compris entre 93 % et 96 %<sup>356</sup>.

Le titre d'un denier de Louis le Pieux apparaît dans l'article de Mulazzani cité précédemment (93,0 %) ; néanmoins, le type de ce denier de Pavie n'est pas précisé, et il peut donc s'agir du Type 1 ou du Type 2<sup>357</sup>.

Les monnaies du Type 3 de Louis le Pieux frappé entre 822/3 et 840 sont bien plus fréquentes que les précédentes dans les trésors et dans les collections ; davantage d'analyses ont pu être réalisées. Hormis deux deniers des trésors de

---

<sup>352</sup> (Ilisch *et al.*, 2003) p. 147.

<sup>353</sup> « *No analysis of silver content has yet been undertaken* » dans (Coupland, 1990) p. 26. Aucune analyse n'est à notre connaissance venue combler cette lacune depuis ce constat de Coupland en 1990.

<sup>354</sup> (Brambilla, 1883) p. 86 pour la monnaie pavesane et (Papadopoli, 1893) p. 41 pour la vénitienne.

<sup>355</sup> (Metcalf, 1972) p. 405 : « *The Italian coins of Charlemagne have much lower gold contents, and this is confirmed by a careful assay made at Paris for Papadopoli of a Venetian denaro of Louis I: it showed 89.8 per cent silver and 0.05 per cent gold. In a similar coin of Pavia analysed for Brambilla no gold was noticed (silver 94.4 per cent, alloy 5.6 per cent), but this may have been simple cupellation.* ». Malheureusement, ce passage manque de précision : il est tout d'abord énoncé sans justification que les monnaies italiennes de Charlemagne contiennent beaucoup moins d'or que les autres ; puis sont présentés des résultats censés confirmer cette observation, obtenus sur deux deniers du Type 2 de Louis. Et si effectivement le denier vénitien contient peu d'or, il est vraisemblable que cet élément soit contenu dans le pourcentage d'argent pour la monnaie de Pavie, si celui-ci a bien été déterminé par coupellation comme cela est supposé.

<sup>356</sup> (Metcalf et Northover, 1989) p. 108.

<sup>357</sup> (Mulazzani, 1888) p. 58. Les deniers du Type 2 étant plus abondants que les précédents, cette solution est la plus probable, néanmoins les données fournies par Mulazzani ne sont pas suffisantes pour pouvoir l'affirmer. La légende du droit HLVDOVVICVS IMP et non HLVDOVICVS IMP AVG renforce cette hypothèse.

Mercurey-Bourgneuf et Fontaine-les-Chalon contenant seulement 45 % d'argent environ<sup>358</sup>, les titres des dix-sept autres pièces analysées s'échelonnent entre 80 % et 96 %, à deux exceptions près<sup>359</sup>. Coupland a fait part de son scepticisme au regard des deux titres inférieurs à 50 % publiés par Prou dans son article spécifique au monnayage de Louis le Pieux, et y suggère une inversion entre les valeurs déterminées pour ces monnaies et celles obtenues pour des deniers plus tardifs de Charles le Chauve<sup>360</sup>. Les fragments des monnaies issues de la trouvaille de Mercurey-Bourgneuf restant après les analyses chimiques conduites par Prou sont demeurés au Cabinet des Médailles (Références 1029a et 1029b). Nous avons donc pu procéder à l'analyse complémentaire de ces fragments de deniers, par LA-ICP-MS et par ANRC ; il s'est avéré que les deux pièces contiennent chacune environ 85 % d'argent, et non 44,2 % pour 1029a et 86,6 % pour 1029b comme Prou le rapportait. Le denier du trésor de Fontaines pour lequel l'analyse de Prou a révélé un titre de 45,5 % n'a pas pu être analysé. Néanmoins, nos analyses complémentaires semblent confirmer le doute émis par Coupland. L'ensemble des résultats publiés par Prou doit en conséquence, selon nous, être considéré avec circonspection.

Une monnaie du trésor de Roermond du Type 3 de Louis le Pieux contient moins de 75 % d'argent et 3 % de zinc environ. Une autre pièce de ce trésor d'un titre de 87 % d'argent environ est relativement riche en or (1,24 %)<sup>361</sup>.

Aucune analyse n'est disponible pour les monnaies de Pépin I<sup>er</sup> comme de Pépin II d'Aquitaine<sup>362</sup>.

Pour Lothaire, deux analyses de monnaies italiennes de Milan et de Pavie contenant 75 % d'argent environ ont été publiées par Mulazzani<sup>363</sup>. Van de Chijs a

---

<sup>358</sup> (Prou, 1898). Voir (Coupland, 1990) p. 39 pour une discussion de ces résultats surprenants. On notera que ces analyses ont été reprises de manière erronée par Metcalf et Northover ((Metcalf et Northover, 1989) p. 108) : ces auteurs mentionnent dans leur article cinq analyses publiées par Prou de deniers du type *XPISTIANA RELIGIO* de Louis le Pieux ; il n'y en a en réalité que trois – les trois que nous avons mentionnées. Les deux autres valeurs citées concernent des deniers de Charles le Chauve antérieurs à l'Edit de Pîtres (*CARLVVS REX FR* autour d'une croix au droit et *XPISTIANA RELIGIO* autour d'un temple au revers) publiées également par Prou.

<sup>359</sup> (Mulazzani, 1888) p. 48, (Prou, 1898) p. 228-230, (Gruaz, 1922) p. 211, (Chenu, 1931-1932) p. 114, (Metcalf *et al.*, 1968) p. 40 et 57, (Metcalf et Northover, 1989) p. 109, (Ilisch *et al.*, 2003) p. 146-147.

<sup>360</sup> « ...is it not probable that Prou – or his technician – mixed up the results of the analyses? [...] Such factors leave me sceptical of Prou's figures until they are corroborated by modern results », Coupland, (Coupland, 1990) p. 39.

<sup>361</sup> (Metcalf et Northover, 1989) p. 109.

<sup>362</sup> (Coupland, 1989) p. 215.

<sup>363</sup> (Mulazzani, 1888) p. 58.

fait état d'un denier au temple de Dorestad de ce souverain qui contenait de 16 % à 25 % d'argent seulement<sup>364</sup>. Les titres de deux exemplaires de Dorestad analysés plus récemment (un au temple et un avec le nom de l'atelier émetteur dans le champ), étaient quant à eux supérieurs à 93 %<sup>365</sup>. Leurs teneurs en or et zinc étaient de plus nettement supérieures aux valeurs obtenues pour les monnaies de types antérieurs. Un troisième exemplaire au nom d'atelier dans le champ ne contenait, quant à lui, que 61 % d'argent. Si l'on en croit Metcalf et Northover, cette monnaie serait similaire à celle référencée 818 dans MEC<sup>366</sup>. D'après ce dernier ouvrage, il s'agirait d'une imitation frisonne de monnaie de Lothaire<sup>367</sup>.

Metcalf et Northover ont tenté dans une de leurs publications d'offrir une vue d'ensemble sur la frappe monétaire en France et en Angleterre depuis la fin du VIII<sup>e</sup> siècle jusqu'à l'édit de Pîtres<sup>368</sup>. Une vingtaine d'analyses de deniers de Charles le Chauve antérieurs à 864, de la collection de Grierson pour l'essentiel, et illustrés dans MEC (1.832 à 1.837 et 1.842 à 1.849), sont publiées dans cet article. Trois des monnaies dont la composition a été déterminée sont du type au nom d'atelier dans le champ (MEC 1a), quatre du type à la porte de ville (1c), et onze au temple (1e). Les titres de ces pièces sont très variables, de plus de 90 % d'argent pour les plus pures à moins de 50 % pour les plus altérées. Aucune corrélation entre le titre d'argent et le type monétaire ne semble ressortir. En outre, des teneurs en zinc très élevées apparaissent pour certaines des monnaies analysées : la plupart en contiennent plus d'un pourcent, quelques-unes plusieurs pourcents, et la plus riche près de dix pourcents.

Prou a publié les résultats d'analyses chimiques pratiquées sur des monnaies de Charles le Chauve antérieures à la réforme de 864<sup>369</sup>. Deux deniers au temple et à la légende chrétienne auraient contenu 41,5 % et 92,5 % d'argent. Ces titres sont toutefois à considérer avec circonspection : il s'est en effet avéré que l'un des résultats de cette publication est faux<sup>370</sup>.

---

<sup>364</sup> (Van der Chijs, 1866) p. 158.

<sup>365</sup> (Metcalf et Northover, 1989) p. 118-119.

<sup>366</sup> (Metcalf et Northover, 1989) p. 118-119.

<sup>367</sup> MEC p. 532 et Pl. 37. Selon Coupland, le titre faible de la monnaie qualifiée d'« imitation frisonne » dans MEC ne doit pas être corrélé à des particularités d'ordre numismatique comme la dégénérescence des légendes ou la grossièreté des gravures. La monnaie de titre faible (MEC 1.820) avait certes été détectée par Grierson et Blackburn comme une imitation frisonne. Cependant, l'étude numismatique avait également suggéré à ces auteurs qu'une autre l'était (MEC 1.820), or l'analyse de Metcalf révèle un excellent titre d'argent pour cet exemplaire. Voir (Coupland, 2001) p. 167.

<sup>368</sup> (Metcalf et Northover, 1989) p. 114-115.

<sup>369</sup> (Prou, 1898) p. 227.

<sup>370</sup> Voir *supra* p. 291.

Des analyses de monnaies de Charles le Chauve du Type GDR frappées après 864 sont publiées par Metcalf et Northover. Il s'agit pour l'essentiel de monnaies du trésor de Cuerdale qui aurait été enterré vers 905<sup>371</sup>. Les analyses de vingt-deux pièces de ce trésor correspondant à huit ateliers différents, ainsi que celles de douze pièces supplémentaires, sont présentées dans cette publication. Outre les monnaies du Type GDR, figurent six monnaies de Melle et trois de Bourges au monogramme carolin dans la même publication de Metcalf et Northover. Leur présence dans un trésor daté du début du X<sup>e</sup> siècle lève l'incertitude de leur attribution à Charlemagne ou Charles le Chauve et les rapproche sans aucun doute du second. La frappe des deniers de ce type semble avoir été continue de part et d'autre de la réforme de 864 en Aquitaine, bien que d'autres types aient coexisté dans certains ateliers. La datation du trésor de Cuerdale nous incite à les rapprocher de la fin du règne de Charles le Chauve, soit après 864. Toutes ces monnaies au monogramme sont d'un titre excellent compris entre 90 % et 95 % d'argent, pour les huit deniers comme pour l'obole. Les teneurs en or sont relativement fortes, le plus souvent autour de 0,7 %, et le zinc est présent à l'état de trace (0,1 % environ). Les remarques concernant les éléments mineurs et traces sont les mêmes pour les monnaies du Type GDR. Leurs titres sont plutôt élevés à l'exception d'une pièce du Palais qui ne contient que 60 % d'argent environ. Les valeurs pour les autres échantillons sont toutes supérieures à 85 %, et comprises entre 90 % et 95 % pour les deux tiers d'entre elles. La représentation en histogramme de répartition présentée par Metcalf et Northover<sup>372</sup> met en évidence une fréquence importante des teneurs en argent proches de 95 %. Cela suggère, selon ces auteurs, que le standard de titre des monnaies aurait été de l'ordre de 95 %, mais que certains exemplaires auraient contenu légèrement moins d'argent.

Gariel rapporte l'analyse d'un denier de l'atelier du Palais du Type GDR du trésor de Glisy. La composition calculée à partir des données massiques fournies par ce numismate serait de 91,2 % d'argent, 8,3 % de cuivre et 0,5 % d'or<sup>373</sup>. Gariel mentionne en outre : « *L'essai à la pierre de touche a donné, pour beaucoup d'autres pièces, la preuve d'un titre très élevé, probablement au-dessus de 900 millièmes*<sup>374</sup>. ».

---

<sup>371</sup> (Metcalf et Northover, 1988) p. 99.

<sup>372</sup> (Metcalf et Northover, 1988) p. 101.

<sup>373</sup> Gariel I p. 95.

<sup>374</sup> Gariel I p. 96. Ce « résultat », comme le précédent concernant les pièces du trésor de Glisy, n'a pas été repris dans l'Annexe 4 qui recense les analyses antérieures sur des monnaies de mêmes types que celles étudiées dans cette thèse.

Des analyses de deniers du Type GDR apparaissent dans la publication de Prou qui présente les compositions de quelques monnaies issues de trésors<sup>375</sup>. Le titre d'un denier du Mans serait de 94,0 % d'argent, celui de deux exemplaires de Rennes de 45,6 % et 45,5 %, et celui d'un au nom de « *Curtisasonien* » de 92,8 %<sup>376</sup>. Le probable mélange de certaines valeurs dans cette publication nous incite à la prudence quant à la prise en compte de ces résultats. Il pourrait toutefois s'agir pour les deniers au nom de Rennes des premières frappes du royaume de Bretagne et non d'émissions effectuées sous l'autorité de Charles le Chauve<sup>377</sup>. Cela expliquerait la particularité des pièces de cet atelier du point de vue de leur pureté d'argent.

L'analyse chimique d'un denier de Venise frappé au Type 2 de Louis le Pieux a révélé un titre d'argent de 89,8 %<sup>378</sup>.

Un denier du Type *Xpe Salva Venecias* analysé par Papadopoli à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle avait un titre de 70 % d'argent environ<sup>379</sup>.

Un exemplaire vénitien de Lothaire portant +VENEZIA au revers a également été analysé par Papadopoli ; cette monnaie contenait 72 % d'argent<sup>380</sup>.

Relevons enfin dans un souci d'exhaustivité une analyse réalisée au XVIII<sup>e</sup> siècle et citée par Prou, selon laquelle le titre des deniers carolingiens serait de 95,8 %<sup>381</sup>. Le manque de précision quant au type de monnaies concernées ne permet évidemment pas d'intégrer ce résultat à notre réflexion. Un autre résultat inexploitable peut être mentionné dans ce paragraphe : il s'agit de l'analyse destructive de pièces du trésor de Bonnevaux (86) qui contenait environ cinq mille deniers de Melle au monogramme carolin, ainsi que divers exemplaires de Charles le Chauve, Eudes et Carloman. Les teneurs en argent et en or sont mentionnées, ce qui laisse penser que les pièces ont été fondues pour être coupellées afin de séparer le cuivre des métaux précieux, puis l'or extrait de l'argent par réaction chimique<sup>382</sup>.

---

<sup>375</sup> (Prou, 1898) p. 227.

<sup>376</sup> (Prou, 1898) p. 227.

<sup>377</sup> (Salaün, 2003).

<sup>378</sup> (Papadopoli, 1893) p. 41.

<sup>379</sup> (Papadopoli, 1893) p. 49.

<sup>380</sup> (Papadopoli, 1893) p. 47.

<sup>381</sup> Prou, p. XLIII.

<sup>382</sup> « *Les pièces rares ou curieuses mises à part, le reste fut livré au creuset. Les essais opérés sur l'ensemble donnèrent 0,850 argent et 0,007 or.* » dans Gariel I p. 124. Voir également (Fillon, 1856) p. 42.

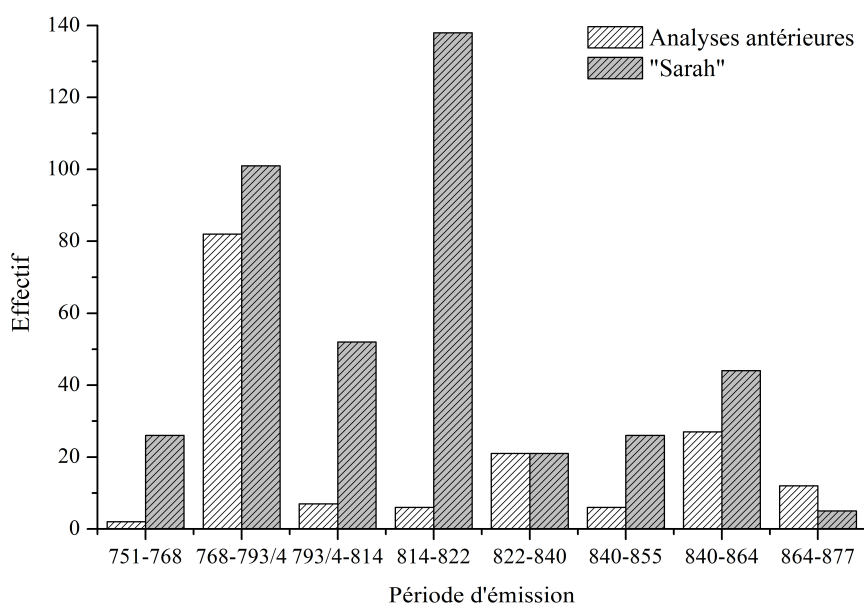


Les résultats obtenus ainsi n'ont pas de sens pour une interprétation historique ; Gariel mentionne donc une composition moyenne pour les quelques milliers de pièces qui serait de 85 % d'argent et de 0,3 % d'or.

## **II. Regard critique sur les analyses antérieures**

Cent-soixante-neuf analyses au total ont été recensées. Cinq souverains carolingiens sont concernés : Pépin le Bref, Charlemagne, Louis le Pieux, Lothaire et Charles le Chauve. Huit grandes périodes peuvent être distinguées du point de vue de la frappe monétaire : le règne de Pépin le Bref (751-768) ; les années du règne de Charlemagne antérieures à la réforme (768-793/4) ; les années du règne de Charlemagne postérieures à la réforme (793/4-814) ; la première partie du règne de Louis le Pieux (814-822/3) ; la deuxième partie règne de Louis le Pieux (822/3-840) ; les années du règne de Charles le Chauve antérieures à l'édit de Pîtres (840-864) ; les années du règne de Charles le Chauve postérieures à l'édit de Pîtres (864-877) ; le règne de Lothaire (840-855).

La représentation graphique du nombre d'analyses répertoriées dans les publications antérieures apparaît sur la Figure 111, en comparaison avec celui des nôtres. Parmi les huit périodes définies, un nombre de résultats conséquent peut être recensé pour seulement trois pour les analyses antérieures : la période de frappe de Charlemagne antérieure à la réforme de 793/4 (82 résultats), les années correspondant à l'émission des monnaies au temple de Louis le Pieux entre 822/3 et 840 (21), et celles de la première phase du règne de Charles le Chauve avant 864 (27). Les principales lacunes sont le règne de Pépin le Bref, la période de règne de Charlemagne postérieure à la réforme de 793/4, la première période du règne de Louis le Pieux (814-822/3), les années de règne de Charles le Chauve postérieures à l'édit de Pîtres et le règne de Lothaire. Les monnaies de Carloman, de Louis roi d'Aquitaine, celles de Pépin I<sup>er</sup> et de Pépin II d'Aquitaine sont absentes des publications d'analyses. Aucune obole n'a été recensée parmi l'ensemble des monnaies caractérisées par le passé. L'Italie est de plus largement négligée, alors que l'analyse des monnaies italiennes, dont les caractéristiques typologiques et la période de frappe peuvent différer de celles issues des autres ateliers du territoire carolingien, présente un intérêt historique évident pour la compréhension de l'intégration de l'ex-royaume lombard au territoire franc.



**Figure 111** – Comparaison du nombre d'analyses de monnaies carolingiennes publiées antérieurement avec celui de nos analyses ("Sarah") par période d'émission<sup>383</sup>.

Plus encore que le nombre d'analyses, les méthodes employées présentent des limitations qui incitent à la prudence, et leur diversité parmi les publications antérieures réduit la lisibilité des comparaisons de compositions.

Les pièces carolingiennes présentent des caractéristiques intrinsèques qui les classent parmi les monnaies d'argent les plus complexes à analyser. L'enrichissement de surface caractéristique des échantillons de ce type, combiné à l'extrême finesse des pièces carolingiennes, constitue une limitation pour les analyses telles qu'elles ont été pratiquées antérieurement. Les résultats obtenus même par des méthodes qui caractérisent les échantillons dans leur ensemble, comme les analyses chimiques destructives ou l'analyse par Activation aux Neutrons Rapides de Cyclotron (ANRC), peuvent être affectées par l'enrichissement de surface<sup>384</sup> : cette couche perturbée est d'autant plus susceptible de représenter une proportion importante de l'ensemble des échantillons que ceux-ci sont fins. La surestimation du titre d'argent entraînée par l'enrichissement de

<sup>383</sup> Les monnaies de Pépin II d'Aquitaine de notre *corpus* ont été ajoutées à celles de la Première période d'émission de Charles le Chauve sur ce graphique. Les pièces au monogramme carolin attribuables à Charles le Chauve sans qu'il soit possible de préciser leur période d'émission (37 exemplaires), ainsi que celles du même type qui ne peuvent être associées à ce dernier souverain ou à Charlemagne (14), n'apparaissent pas sur cette Figure.

<sup>384</sup> (Guey, 1965). Les observations que Guey restreint aux seuls « *essais chimiques* » concernent en réalité toute méthode d'analyse globale des échantillons. Les remarques formulées dans cette publication s'appliquent donc également aux analyses effectuées par des méthodes nucléaires globales comme l'ANRC.

surface pourra être conséquente comme négligeable, sans qu'il soit possible de le déduire des valeurs obtenues.

Les caractéristiques des méthodes employées par le passé ainsi que leurs limitations pour la caractérisation des monnaies d'argent ont été présentées dans la première partie de cette thèse ; elles ne sont donc pas reprises ici. Outre les conséquences de l'enrichissement de surface, on peut relever que la plupart de ces méthodes ne permettent pas le dosage de tous les éléments qui peuvent s'avérer utiles pour des études de provenance, et que leurs limites de détection pour les constituants mineurs peuvent être élevées.

Au-delà des caractéristiques intrinsèques des méthodes d'analyse appliquées par le passé aux monnaies d'argent, l'examen des résultats publiés antérieurement met en évidence une grande diversité de méthodes et d'analyses. Cela nuit de toute évidence à l'intérêt de la comparaison des résultats entre eux. Cette problématique peut être résumée ainsi : dans quelle mesure des équipes qui utilisent une même méthode d'analyse mais un protocole différent, ou des méthodes elles-mêmes différentes, obtiendraient-elles des résultats identiques sur de mêmes échantillons ? Aucune comparaison inter-laboratoires n'a été entreprise afin d'étudier cette question. La justesse absolue de l'ensemble des analyses antérieures est donc hypothétique.

L'interprétation des résultats d'analyses antérieurs de monnaies carolingiennes semble donc malaisée au vu des différents facteurs présentés. Si l'on excepte le Type 2 de Charlemagne, pour lequel un grand nombre d'analyses a été effectué par une même équipe utilisant une même méthode – méthode qui présente toutefois des limitations importantes pour l'analyse des monnaies d'argent –, les résultats disponibles sont d'une manière générale peu représentatifs. Il semble en outre difficile de comparer entre elles les compositions répertoriées pour chaque type monétaire dans la mesure où rien ne garantit leur justesse absolue.

L'analyse d'un grand nombre de monnaies d'argent par une même méthode qui permet de déterminer la composition des alliages sous la couche d'enrichissement de surface, et avec des limites de détection très basses, est une réponse appropriée pour une compréhension globale de la frappe et de la circulation monétaires durant une période et dans un territoire définis. Pour les monnaies carolingiennes, l'analyse par LA-ICP-MS telle qu'elle a été définie dans la première partie de cette thèse semble constituer la meilleure approche pour l'aspect analytique de la problématique. La collection de la BnF qui, malgré

certaines lacunes, constitue l'une des plus importantes de ce type sinon la plus importante, est un excellent support pour envisager l'analyse d'un grand nombre d'échantillons, et ainsi offrir la meilleure représentativité des monnayages considérés.

## G. Interprétation des résultats des analyses

### I. Les fausses monnaies

Des monnaies de notre *corpus* ont été considérées comme fausses lorsque leur titre s'est avéré nettement plus faible que celui des échantillons de même type formant un groupe homogène de ce point de vue<sup>385</sup>. Des doutes avaient été émis par le passé quant à l'authenticité de certaines d'entre elles. Ces suspicions ont été confirmées par l'analyse dans certains cas, tandis que d'autres monnaies douteuses ont révélé des compositions similaires à celle de pièces de même type dont l'authenticité n'avait pas été discutée par le passé.

Les critères définis par Lafaurie pour qu'une monnaie soit considérée comme « fausse » sont une masse trop faible et un argent allié avec un autre métal<sup>386</sup>.

La masse des deniers ne peut être utilisée ici pour identifier les monnaies qui auraient été considérées comme fausses du point de vue de la législation carolingienne : la circulation des pièces, et sans doute plus encore leur enfouissement, peuvent avoir causé des dégradations qui entraînent des pertes de matière et donc de masse.

Le titre des deniers est un critère plus objectif, *a fortiori* dans une étude qui porte sur l'analyse des alliages qui les composent. L'interprétation de Lafaurie des textes législatifs carolingiens de ce point de vue n'est toutefois pas utilisable en l'état : dans l'Occident carolingien, les monnaies d'argent contiennent au minimum quelques pourcents de cuivre. Cet ajout est vraisemblablement destiné à durcir le métal afin que ces pièces, particulièrement fines, résistent aux contraintes durant leur circulation<sup>387</sup>. Les monnaies constituées d'argent et d'un autre composant n'ont donc pas toutes été considérées comme fausses : aucune des monnaies carolingiennes analysées n'a révélé une composition d'argent pur. Rappelons que

---

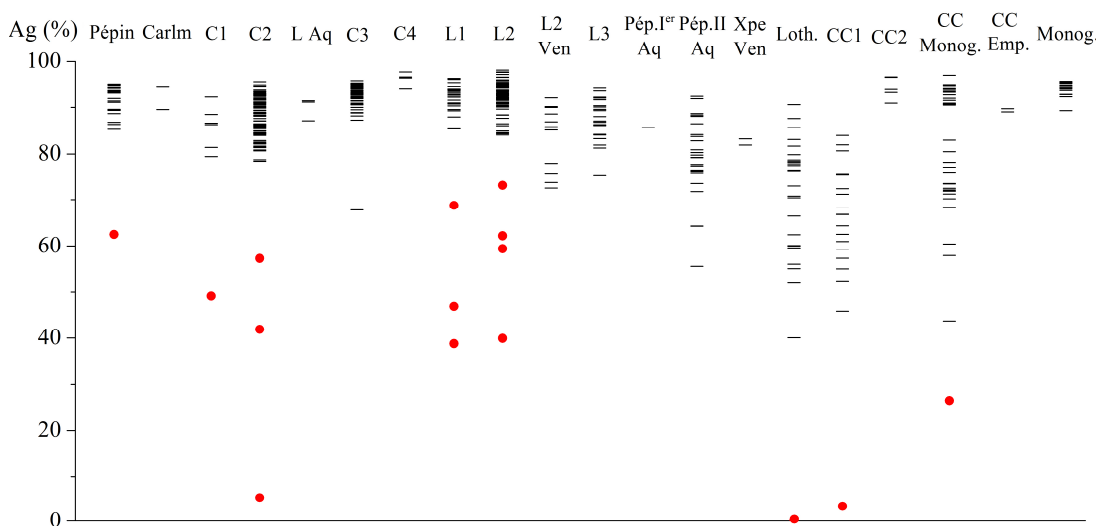
<sup>385</sup> Sur la définition de la fausse monnaie et notre interprétation sur ce point voir *supra* p. 203.

<sup>386</sup> (Lafaurie, 1977) p. 494.

<sup>387</sup> Bien que cet auteur ne discute pas spécifiquement de fabrication monétaire, Meyers mentionne l'ajout de 5 % de cuivre environ à l'argent pour le durcir pour des objets d'art. (Meyers *et al.*, 1974) p. 23.

dès que des textes sont disponibles, on constate que dans les ateliers monétaires on raisonne sur un titre d'argent de référence (considéré comme pur) qui est de 95,8 % (argent le roi en France) ou de 92 % (argent esterlin en Angleterre).

La représentation graphique des titres déterminés pour les monnaies de chaque type monétaire ou période d'émission nous a semblé constituer la meilleure approche pour identifier les pièces qui ne correspondent pas au standard de titre d'argent (Figure 112). Pour chaque type monétaire, les valeurs individuelles représentées définissent des gammes de teneurs qui semblent représentatives des variations de titre des « bonnes monnaies ». Les pièces dont la teneur en argent s'est révélé largement inférieure à la borne minimale définie pour chaque type ont été considérées comme fausses.



**Figure 112** - Représentation graphique du titre d'argent des monnaies de chaque type pour l'identification des faux. Les échantillons qui apparaissent sous forme de ronds rouges sont ceux qui ont été considérés comme faux.

Les monnaies concernées sont présentées dans les paragraphes qui suivent de manière chronologique. Les cas de certaines pièces pour lesquelles des suspicions de fausse monnaie avaient été émises par le passé, mais dont le titre déterminé par LA-ICP-MS s'est avéré cohérent avec la majorité des exemplaires de même type, sont également discutés.

Le denier de Pépin le Bref Prou 4 présente un titre d'argent inférieur de 20 % environ à celui du moins pur parmi les autres exemplaires de ce souverain, qui constituent un groupe homogène. Cette pièce a donc été considérée comme fausse.

Lafaurie a émis l'hypothèse que la monnaie de Pépin le Bref Prou 86 pourrait être un faux moderne créé d'après un exemplaire du trésor d'Imphy<sup>388</sup>. L'analyse ne permet pas de confirmer cette suspicion : le titre déterminé de 89,6 % est cohérent avec les bonnes monnaies de la même période. Peut-être s'agit-il d'une mauvaise copie d'un coin au sein d'un atelier monétaire sans qu'il y ait eu volonté de tromper.

Les deux deniers de Carloman analysés sont relativement purs, et leurs titres d'argent proches. Ils ont donc été considérés comme authentiques.

Des doutes avaient été émis par le passé quant à l'authenticité du denier Prou 941 du Type 1 de Charlemagne (768-771)<sup>389</sup>. Prou rapporte dans la notice de cette monnaie<sup>390</sup> la réserve émise par Gariel à ce sujet. Selon ce dernier numismate, Prou 941 « *porte au droit une légende qui est la copie servile* » d'un denier frappé à Sainte-Croix<sup>391</sup>. Gariel mentionne une monnaie du trésor d'Imphy, « *dont le droit, écrit Prou, est tout semblable en effet à celui de notre pièce, mais qui ne saurait lui avoir servi de modèle, attendu que la trouvaille d'Imphy date de l'année 1858, et que le denier n° 941 dont il conteste l'authenticité a été acquis par la Bibliothèque nationale, en 1850, de M. J. E. Eckel de Strasbourg.*<sup>392</sup> ». Prou conclut donc sa démonstration en supposant que le denier Prou 941 est authentique. Bien que l'argumentation de Prou soit logique et convaincante, elle démontre seulement l'ancienneté de cette pièce, et non son authenticité. L'analyse semble donner raison à Gariel : Prou 941 ne contient en effet que 49,1 % d'argent d'après notre analyse, soit près de 30 % de moins que la pièce authentique du même type la moins pure. Il semble donc que Prou 941 soit une fausse monnaie fabriquée durant la première partie du règne de Charlemagne afin d'être intégrée à la circulation monétaire.

Trois monnaies du Type 2 de Charlemagne présentent des titres qui les classent parmi les exemplaires considérés comme faux (Figure 112) : Prou 96 de Dinant (5,3 % d'argent), Prou 541 de Troyes (41,2 %) et Prou 895, probablement

---

<sup>388</sup> (Lafaurie, 1974) p. 47.

<sup>389</sup> (Grierson, 1967) p. 508 et p. 511.

<sup>390</sup> (Prou, 1896) p. 132.

<sup>391</sup> Gariel II p. 132 : « [Prou 941] *me semble d'une fabrication très anormale. [...] Pour moi, cette pièce est fautive. L'avenir me donnera peut-être tort, je ne le pense pas ; mais, en tout cas, fût-je dans l'erreur, il est, je crois, d'une saine discussion d'écarter de son chemin ces exceptions, ces enfants perdus de la numismatique qui ne se rattachent à rien et viennent se mettre en travers des classifications les mieux établies pour les troubler sans aucun profit pour la science.* ».

<sup>392</sup> Prou, p. 132.

de Milan (57,3 %). Aucun numismate par le passé n'a, à notre connaissance, mis en doute l'authenticité d'un de ces trois deniers.

Prou 96 présente un aspect rouge caractéristique d'un alliage constitué majoritairement de cuivre, et une surface très corrodée. Seules les monnaies qui ne contiennent qu'une faible proportion d'argent présentent de telles caractéristiques ; l'analyse confirme donc ce que l'aspect de Prou 96 suggérait.

Prou 541 de Troyes et Prou 895, vraisemblablement de Milan, ne présentent pas de caractéristiques visuelles qui auraient permis de suspecter un titre d'argent très faible. Ces deux pièces, bien que leur titre soit nettement plus bas que celui du groupe des monnaies du même type considérées comme authentiques, contiennent toutefois plusieurs dizaines de pourcents d'argent ; leur aspect n'est donc pas celui d'un alliage à base de cuivre. Prou 541 et Prou 895 peuvent toutefois être considérées comme des fausses monnaies si l'on compare leur titre avec la plupart des pièces contemporaines. Leur similarité d'aspect avec les monnaies des mêmes types qui ont révélé des titres d'argent élevés, suggère qu'il peut s'agir de faux d'époque fabriqués au sein des ateliers officiels.

Lafaurie avait émis un doute quant à l'authenticité du denier de Reims du Type 2 de Charlemagne Prou 292. La dégénérescence de la légende du revers de cette monnaie a suggéré à ce numismate qu'il pourrait s'agir d'une « *imitation maladroite de la précédente* [Prou 291 – et non Prou 201 comme cela est écrit dans l'article de Lafaurie –, n° 7 sur la Fig. XIII de cet article] *ou œuvre de faux monnayeur* ?<sup>393</sup> ». Les deux deniers Prou 291 et Prou 292 contiennent respectivement 93,3 % et 91,7 % d'argent d'après l'analyse par LA-ICP-MS. La caractérisation de la composition ne permet donc pas de confirmer la suspicion de Lafaurie concernant Prou 292, et semblerait plutôt renforcer l'hypothèse de son authenticité.

Aucune des monnaies de notre *corpus* frappées durant la première partie du règne de Charlemagne au nom de Louis roi d'Aquitaine n'est apparue être fausse du point de vue du titre.

Prou 576 de Sens est la seule parmi les monnaies au monogramme carolin attribuées à Charlemagne et à la période 793/4-812 qui se distingue des autres de par un titre particulièrement faible. Ce denier n'a pas été considéré comme faux car il se pose un problème sur son attribution à ces années du règne de Charlemagne ou

---

<sup>393</sup> (Lafaurie, 1974) p. 47 et dans la description de la pièce n° 8 sur la Fig. XIII.

à la Première période d'émission de Charles le Chauve (840-864) où son titre n'aurait rien de surprenant<sup>394</sup>. Il a donc été exclu des considérations qui suivent.

Quarante-huit exemplaires ont été considérés pour le Type 3 de Charlemagne auxquels peuvent s'ajouter certaines des quatorze monnaies au monogramme carolin dont l'attribution à Charlemagne ou Charles le Chauve est incertaine. Pour les pièces de Charlemagne antérieures à la réforme de 793/4 (Types 1 et 2), ce sont quatre monnaies sur un total de quatre-vingt-seize, soit plus de 4 %, qui ont révélé un titre nettement plus faible que la borne inférieure de la gamme de teneurs des monnaies considérées comme « bonnes ». Le nombre de monnaies frappées après la réforme de 793/4 est plus restreint et peut-être trop faible pour que des fausses aient été mises en évidence. Prou 576, nous l'avons vu, pourrait être l'une d'entre elles. L'absence de pièces de faible titre durant la seconde partie du règne de Charlemagne peut toutefois suggérer que la réforme de 793/4, qui a vu une augmentation de la masse des deniers, ainsi qu'une uniformisation des types de droit et de revers, et, nous le verrons plus loin, de leur titre d'argent, a été efficace du point de vue de la l'élimination des fausses monnaies du numéraire en circulation. Seul un nombre d'analyses plus important de pièces de Charlemagne au monogramme carolin pourrait permettre de confirmer cette observation.

Les quatre deniers au buste du Type 4 de Charlemagne analysés sont tous très purs en argent. Aucun ne peut donc être considéré comme faux du point de vue de son titre.

Trois monnaies du Type 1 au buste de Louis le Pieux (814-818) présentent des titres d'argent très faibles qui les classent parmi les fausses monnaies.

Prou 43 de Strasbourg ne contient que 38,8 % d'argent. L'analyse confirme ce que Grierson supposait pour cette monnaie : il s'agissait selon lui d'une pièce du XVIII<sup>e</sup> siècle identique à celle conservée au musée de Vienne acquise en 1783 qui serait également fausse<sup>395</sup>.

Les deux autres faux deniers du Type 1 de Louis le Pieux sont Prou 857 et Prou 858, tous deux de l'atelier d'Arles. Aucune suspicion n'a, à notre connaissance, été émise par le passé quant à leur authenticité. Deux des trois monnaies au buste de Louis le Pieux au nom d'Arles de la BnF sont donc constituées d'un alliage à bas titre d'argent. Prou 857 présente la particularité d'une gravure rétrograde de la légende au revers ; le buste du droit de Prou 858 est

---

<sup>394</sup> Voir *infra* p. 322.

<sup>395</sup> (Grierson, 1967) p. 503 n. 11.



particulièrement fruste. Ces deux observations n'étaient toutefois pas suffisantes pour que la seule étude numismatique classe ces monnaies parmi celles susceptibles d'être fausses : certaines des pièces d'un titre d'argent élevé présentent en effet des légendes rétrogrades – certes pour d'autres types monétaires au sein de notre *corpus* –, et les bustes sur les deniers du Type 1 de Louis le Pieux sont très variés dans la qualité de leur exécution.

Aucun des deniers du Type 2 de Louis le Pieux (818-822/3) ne se distingue des autres de par un titre faible.

Quatre des oboles contemporaines se sont avérées être fausses : Prou 656 d'Aquitaine, BnF 1982-64 de Melle, Prou 839 de Narbonne et BnF 903a de Pavie. Rien ne laissait augurer un titre faible pour les trois premières, tandis que la quatrième était suspecte dès l'étude numismatique.

Prou 656 est une obole au nom d'Aquitaine qui présente une disposition des légendes identique à celle des deniers de la même période : la titulature impériale apparaît en cercle autour d'une croix au droit, et le revers porte le nom de l'atelier émetteur dans le champ en deux lignes. Son titre est de 62,2 % d'argent. L'autre obole d'Aquitaine du même type Prou 658, qui présente les mêmes dispositions des légendes de droit et de revers, et la troisième du même nom de lieu Prou 657 sur laquelle la disposition est inversée, ont révélé des titres élevés de l'ordre de 92 %. Cela incite donc à considérer Prou 656 comme faux, bien que le nombre d'échantillons soit très réduit.

L'obole de Melle BnF 1982-64 ne contient que 73,4 % d'argent. Cette valeur est largement inférieure à celle des autres oboles du Type 2 de Louis le Pieux qui portent le même nom de lieu d'émission. Cet exemplaire doit donc être considéré comme faux d'après nos critères.

Prou 839 de Narbonne contient moins de 40 % d'argent. Les deux autres oboles du Type 2 de Louis le Pieux issus de ce même atelier, Prou 837 et Prou 838, présentent des titres excellents supérieurs à 92 % d'argent. Il s'agit donc vraisemblablement d'un faux.

BnF 903a est une monnaie qui peut être attribuée à l'atelier de Pavie – bien que sa légende soit dégénérée, PAPA au lieu de PAPIA –, et qui porte au droit le nom de Louis en deux lignes selon le type d'une partie des oboles des années 818-822/3. Aucune mention de cette monnaie n'apparaît dans la littérature : il s'agit d'une acquisition récente de la BnF. Avant même son analyse, cette obole était suspecte : aucun demi-denier pavesan ou même italien n'a été recensé dans les catalogues, *corpus* ou recueils de trésors de monnaies carolingiennes. L'article de Coupland traitant spécifiquement du monnayage de Louis le Pieux, bien qu'il

recense les ateliers ayant émis des oboles au nom de Louis pour les deux types monétaires frappés entre 814 et 822/3, ne mentionne à aucun moment d'exemplaires portant le nom de Pavie<sup>396</sup>. La publication de Rovelli consacrée aux monnaies de Pavie durant le haut Moyen Age ne mentionne aucune obole de Louis le Pieux<sup>397</sup>. La dégénérescence de la légende, ainsi que la grossièreté de son exécution par rapport aux exemplaires des années 818-822/3, ont également contribué à faire considérer cette monnaie avec suspicion. Son analyse a révélé un titre d'argent de 60 % seulement, valeur largement inférieure à celles observées pour les oboles authentiques de la même période. L'obole de Pavie BnF 903a a donc été considérée comme une fausse monnaie.

Aucun des deniers au temple du Type 3 de Louis le Pieux (822/3-840) de notre *corpus* n'apparaît comme faux du point de vue du titre d'argent.

Le seul denier de Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine analysé présente un titre relativement élevé, et ceux de Pépin II d'Aquitaine forment un groupe homogène. Aucun des échantillons de ces deux souverains n'a donc été considéré comme faux.

Aucune des monnaies frappées dans le territoire de Lothaire – ou en dehors pour certaines au nom de ce souverain – n'a été identifié comme fausse, à l'exception du denier de Venise dont le cas spécifique est discuté plus loin.

Le denier de Charles le Chauve au buste de Bourges, Prou 735 (type MEC 1b), est un faux comme l'avaient pressenti Prou<sup>398</sup> puis Coupland<sup>399</sup> : cette monnaie est constituée très majoritairement de cuivre, et ne contient que 3,3 % d'argent. Les autres pièces analysées de la Première période d'émission de Charles le Chauve peuvent être considérées comme authentiques d'après la représentation graphique de leurs titres sur la Figure 112.

Les quelques monnaies analysées de Charles le Chauve du Type GDR, postérieures à l'édit de Pîtres de 864, présentent des titres d'argent élevés et homogènes. Aucune d'elles n'apparaît donc comme un faux de ce point de vue.

---

<sup>396</sup> (Coupland, 1990) p. 28.

<sup>397</sup> (Rovelli, 1995).

<sup>398</sup> Voir la description de cette monnaie dans Prou, que l'auteur qualifie d'« *imitation grossière* » de celle référencée 1 Pl. XXXVII dans Gariel II.

<sup>399</sup> « *The extremely crude nature of the coin, which is quite unlike Charles's other Bourges portrait issues in this respect, raises the suspicion that it might be a contemporary forgery* ». (Coupland, 1989) p. 211.

Les deux oboles impériales de Charles le Chauve analysées sont relativement pures, et leurs concentrations en argent sont proches l'une de l'autre. Aucun de ces deux exemplaires n'a donc été considéré comme faux.

La lecture de la Figure 112 concernant les monnaies au monogramme carolin attribuables à Charles le Chauve est complexe, et nécessite la prise en compte du lieu d'émission de chaque exemplaire, et des particularités numismatiques de chaque exemplaire.

Deux de ces deniers au monogramme carolin de Melle présentent des titres qui les distinguent des autres monnaies du même type et du même atelier : BnF 1996-115 ne contient que 60,4 % d'argent, et Prou 741 43,7 %, alors que cette valeur est d'au moins 89 % pour les autres. Ces monnaies n'ont pas été considérées comme fausses ; des facteurs chronologiques spécifiques aux émissions d'Aquitaine au monogramme carolin sous Charles le Chauve peuvent expliquer la faiblesse de leur titre<sup>400</sup>.

Un autre denier de Melle au monogramme carolin se différencie des autres de par la faiblesse de son titre sur la Figure 112. Cet exemplaire est Prou 702, dont la teneur en argent n'est que de 26,6 %. Il s'agit donc d'une fausse monnaie selon les critères définis.

Le cas des monnaies vénitiennes est particulier : les conditions de la frappe de deniers au type carolingien dans cette cité théoriquement sous domination byzantine ne sont en effet pas connues. L'étude des pièces de Venise aux noms des souverains carolingiens dans les trésors semble montrer qu'elles étaient intégrées à la circulation monétaire. Peut-être devrait-on qualifier les émissions vénitiennes au type carolingien d'imitations, du moins pour certaines d'entre elles, si l'on se fonde sur la définition de Bompaire et Dumas<sup>401</sup> : le nom de Venise apparaît sur les monnaies frappées par cette cité selon le Type 2 de Louis le Pieux, ainsi que sur celles de Lothaire, alors que la cité est théoriquement sous domination byzantine, et non carolingienne. Le titre des monnaies de Venise les distingue de plus de celles frappées à l'intérieur des frontières carolingiennes<sup>402</sup>.

Les monnaies de Venise similaires à celles des Types 2 de Louis le Pieux, celles supposées vénitiennes du Type 3 de ce même empereur, ainsi que les pièces

---

<sup>400</sup> Voir *infra* p. 354.

<sup>401</sup> (Bompaire et Dumas, 2000) p. 109.

<sup>402</sup> La problématique des monnaies vénitiennes est traitée dans un paragraphe spécifique. Voir *infra* p. 413 et suivantes.

du Type particulier à cet atelier à la légende *Xpe Salva Venecias*, forment des groupes homogènes qui nous incitent à ne pas distinguer de faux parmi elles.

Parmi les pièces vénitiennes, il semble indiscutable que Prou 921 au nom de Lothaire entre dans la catégorie des faux modernes. D'après les résultats obtenus par LA-ICP-MS, cette monnaie contiendrait 77 % d'étain et 23 % de plomb<sup>403</sup>. La fiabilité des teneurs de plomb et d'étain déterminées n'est pas optimale puisque le protocole utilisé ne peut théoriquement s'appliquer qu'à des alliages contenant une majorité d'argent. Néanmoins, on peut être sûr que cette monnaie ne contient pas d'argent, et qu'elle est constituée d'un alliage étain-plomb. Les caractéristiques physiques de ce denier (en particulier sa masse), ainsi que son aspect, ne pouvaient laisser présager qu'il s'agit d'un faux. Par rapport aux deniers du Type 2 de Louis le Pieux sur lesquels figure également le nom de l'atelier émetteur dans le champ, la seule différence notable est le passage d'une légende + *VENE/CIAS* en deux lignes à *VENECIA* en une seule ligne. Cependant le même phénomène est observé pour Trévise et Milan.

Il est remarquable qu'aucun denier vénitien de Lothaire n'ait été retrouvé en fouille alors que des exemplaires existent dans les collections<sup>404</sup>. Seule la publication de Grierson qui mentionne l'acquisition par le musée national de Rome d'un millier de coins monétaires d'un faussaire récemment décédé pouvait attirer l'attention sur les monnaies similaires à Prou 921 : une paire de coins illustrée dans cette étude est en effet rigoureusement identique à celle utilisée pour la frappe de cette monnaie<sup>405</sup>.

L'absence de monnaies de Lothaire au nom de Venise dans les trésors peut être interprétée comme l'absence de frappe de telles monnaies durant le IX<sup>e</sup> siècle : peut-être toutes les pièces du type de Prou 921 sont-elles des faux « modernes » mis en circulation sur le marché numismatique par le faussaire italien du début du XX<sup>e</sup> siècle. La comparaison des quelques exemplaires conservés dans les collections avec les coins dont l'image est publiée par Grierson, ou mieux encore une analyse – même par une méthode superficielle – destinée à identifier le constituant principal de l'alliage, pourrait permettre de statuer sur l'authenticité de ces monnaies. Si les pièces vénitiennes s'avéraient être toutes l'œuvre du faussaire italien dont les coins ont été rachetés par le musée national de Rome, la chronologie des émissions monétaires de Venise durant le IX<sup>e</sup> siècle pourrait être

---

<sup>403</sup> Les teneurs déterminées par LA-ICP-MS pour cette monnaie ont été reportées avec l'ensemble des autres résultats obtenus, pour une meilleure commodité de lecture. Cependant, la précision des valeurs calculées pour cet exemplaire, du fait de la particularité de sa composition, n'est pas la même que pour les autres.

<sup>404</sup> Trois dans le *Corpus Nummorum Italicorum Veneto* p. 6.

<sup>405</sup> (Grierson, 1958) Pl. XIX n° 6.

revue : il serait envisageable que les monnaies frappées à Venise durant le règne de Lothaire (840-855) soient celles à la légende *Xpe Salva Venecias*, dont l'attribution aux années d'émission du Type 3 de Louis le Pieux (822/3-840) n'est pas pleinement satisfaisante. Cela constituerait une réponse convaincante à la problématique soulevée par Coupland, qui remarque très justement : «*It is surprising that Venice produced any coinage at all in Lothar's name, given that in 840 the latter signed a treaty with the port guaranteeing its independence and neutrality*<sup>406</sup>». L'analyse d'un autre denier vénitien de Lothaire au XIX<sup>e</sup> siècle a révélé un titre d'argent de 70 % environ<sup>407</sup>, ce qui tendrait à infirmer notre hypothèse. Prou 921 pourrait toutefois être une épreuve à base d'étain réalisée par le faussaire avant de mettre en œuvre la fabrication de faux à base d'argent destinés à tromper les collectionneurs.

L'analyse des deniers de Venise frappés au nom de Lothaire conservés dans d'autres collections serait donc des plus instructives pour une meilleure compréhension de ce monnayage.

Les imitations n'ont pas été considérées dans cette partie sur les fausses monnaies puisqu'il ne s'agit pas d'émissions frauduleuses.

Des imitations dites frisonnes de monnaies carolingiennes ont semble-t-il existé ; certains ont suspecté les pièces de Lothaire au nom de Dorestad sur lesquelles la titulature impériale HLOTARIVS est dégénérée en IOTAMVS de ne pas être des émissions de ce souverain mais l'œuvre de Frisons ou Vikings. Cela n'est pas certain, aussi les monnaies suspectes sont considérées *a priori* au même titre que les autres frappes de Lothaire, mais une attention particulière leur est accordée lors de l'interprétation des résultats analytiques. La capacité de la population du nord du territoire de Lothaire majoritairement analphabète à distinguer les émissions frisonnes ou scandinaves plus grossières des pièces véritables de ce souverain n'est pas discutée ici. La faible habileté des monnayeurs sous les ordres des autorités frisonnes ou scandinaves peut être à l'origine de la différence de style observée entre les « imitations » et les « modèles » ; la volonté de ces autorités d'émettre des monnaies proches de celles de Lothaire sans chercher à les reproduire exactement peut également être discutée. Quand bien même les monnaies sur lesquelles la titulature de Lothaire apparaît sous la forme IOTAMVS seraient des imitations, il nous semble qu'elles ne doivent pas être regroupées avec les contrefaçons et faux destinés à tromper le sujet carolingien ou le numismate moderne.

---

<sup>406</sup> (Coupland, 2001) p. 177-178.

<sup>407</sup> (Papadopoli, 1893) p. 47.

Il pourrait s'agir d'une situation similaire à celle des ateliers bretons sous Charles le Chauve : des monnaies de Rennes et de Nantes et au nom de ce souverain auraient en effet été frappées selon le Type GDR dans le royaume naissant de Bretagne, mais pas sous son autorité<sup>408</sup>.

## II. L'évolution du titre d'argent

Les caractéristiques de titre des différents types monétaires analysés sont présentées dans les paragraphes qui suivent. Certains échantillons ont été écartés des observations déduites de l'étude des teneurs en argent. Les monnaies vénitiennes – ou supposées pour le Type 3 de Louis le Pieux – ont été traitées dans un paragraphe spécifique eu égard à la particularité de cet atelier par rapport aux autres, et à certaines caractéristiques de composition des monnaies qui en sont issues. Les résultats obtenus pour les monnaies de Melle et les exemplaires italiens, s'ils sont intégrés à la réflexion générale au contraire des pièces vénitiennes, ont également été étudiés spécifiquement du fait de problématiques particulières. Les oboles ont enfin été dissociées des deniers, et les éventuelles différences qui pourraient apparaître entre les deux espèces sont également étudiées séparément.

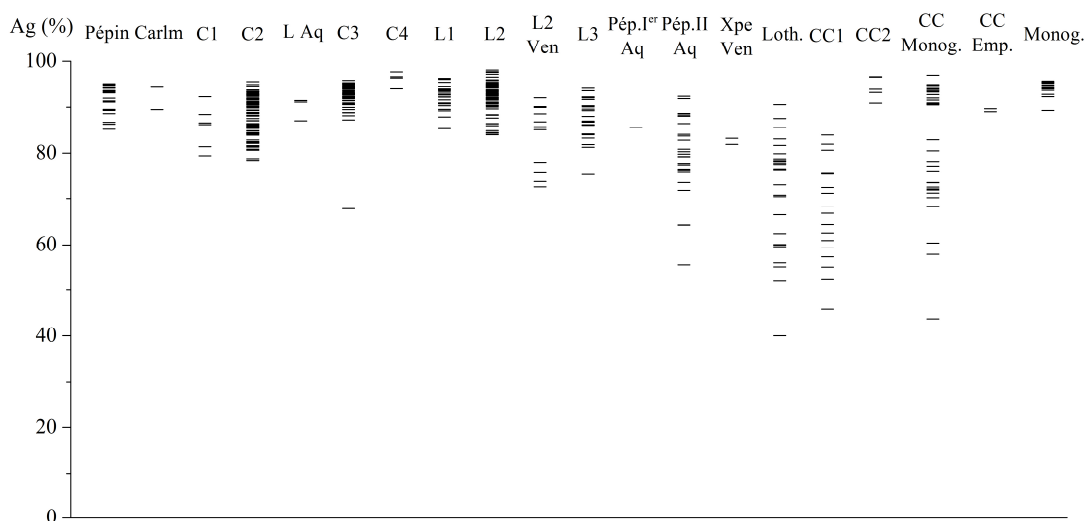
Les valeurs qui apparaissent dans le texte et sur les graphiques sont les teneurs réelles en argent, et non comme cela est pratiqué par certains analystes la teneur « apparente » en argent, c'est-à-dire la combinaison des éléments que les chercheurs modernes estiment que les monnayeurs considéraient comme de l'argent pur. Les interprétations effectuées portent alors sur la somme des teneurs en argent et en or, auxquels s'ajoute parfois le plomb<sup>409</sup>. Cette approche n'est pas celle que nous avons suivie. Les concentrations en or sont d'une manière générale suffisamment faibles et celles en plomb suffisamment proches pour que la comparaison entre les teneurs réelles en argent et la somme des concentrations de cet élément avec l'or et le plomb ne modifie par l'interprétation des résultats. Lorsque des teneurs particulièrement élevées de ces deux éléments sont rencontrées, une réflexion peut être engagée sur la volonté ou la conscience du monnayeur ancien d'ajouter or ou plomb à l'argent.

Les résultats complets des analyses pratiquées par LA-ICP-MS sur les monnaies carolingiennes apparaissent à la fin du second volume de cette thèse (Catalogue).

---

<sup>408</sup> Voir (Salaün, 2003).

<sup>409</sup> (Metcalf et Northover, 1988) p. 101 et (Metcalf et Northover, 1989) p. 104.



**Figure 113** - Représentation graphique de l'évolution du titre d'argent des monnaies carolingiennes par type monétaire ou période d'émission.

La Figure 113 présente les titres d'argent déterminés pour les monnaies des principaux types monétaires étudiés afin de visualiser l'évolution de la pureté des alliages à chaque changement de type monétaire ou de renouvellement du numéraire en circulation.

### 1. Pépin le Bref (751-768)

Les monnaies frappées au nom de Pépin le Bref entre 751 et 768 présentent des titres d'argent plutôt élevés. Les valeurs déterminées par LA-ICP-MS s'échelonnent de 85 % à 95 %. La moyenne de l'ensemble des teneurs en argent est de 92,0 %. L'écart-type relatif, qui représente la dispersion des valeurs, est relativement peu élevé (3,1 %), et montre une bonne homogénéité des titres d'argent pour l'ensemble des pièces analysées.

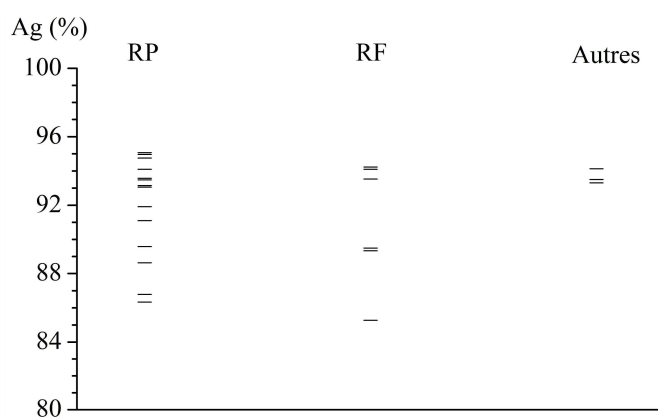
Les titres d'argent obtenus par Metcalf pour des deniers de Pépin le Bref, seuls disponibles dans la littérature, sont respectivement de 89,6 % pour un exemplaire de Reims et de 90,1 % pour un de Quentovic<sup>410</sup>. Nos analyses de pièces de ces deux ateliers ont révélé des teneurs en argent de 94,2 % et de 94,1 %. Bien que de légères différences apparaissent, les valeurs sont cohérentes et montrent la bonne pureté des monnaies de Pépin le Bref.

Les analyses de deniers mérovingiens publiées par Metcalf ont révélé des titres d'argent très élevés de l'ordre de 90 % à 95 %, à l'exception de ceux de Marseille et au nom de *Nemfidius*<sup>411</sup>. Ces résultats sont certes à considérer avec

<sup>410</sup> (Metcalf et Northover, 1989) p. 106.

<sup>411</sup> (Metcalf, 1983).

précautions : l'auteur rapporte des écarts pour l'argent qui atteignent 10 % à 20 % sur la même zone polie d'un même échantillon<sup>412</sup>. Des monnaies dont l'enfouissement est daté par Lafaurie de 740-745<sup>413</sup> sont incluses dans cette étude, ce qui signifie qu'elles ne sont antérieures à celles de Pépin le Bref que de quelques années. La comparaison de ces résultats avec les nôtres, pour les exemplaires du premier roi carolingien, semble donc montrer qu'il y a une continuité dans le titre d'argent des deniers entre la fin de la période mérovingienne et le début de la période carolingienne.



**Figure 114** - Représentation graphique du titre d'argent des deniers de Pépin le Bref à la légende RP, RF ou d'un autre type de droit.

La représentation graphique des titres des deniers de Pépin le Bref selon le type de légende au droit (Figure 114) montre une similarité de ce point de vue pour les deux principales variétés : les moyennes des teneurs en argent déterminées pour les pièces sur lesquelles apparaît la légende RP au droit est de 91,9 %, tandis qu'elle est de 91,3 % pour celles qui portent RF dans le champ sur cette face. Les trois autres deniers qui portent au droit le nom de Pépin développé sous différentes formes et au revers la légende RxF présentent des titres proches les uns des autres de l'ordre de 93 % à 94 % d'argent. La moyenne est légèrement plus élevée (93,6 %) que celle des deux principaux types monétaires de Pépin le Bref.

Ces résultats ne confirment donc pas la tendance observée par Lafaurie d'après l'étude métrologique des pièces de Pépin le Bref de ces deux types : les masses des deniers à la légende RP sont en effet plus dispersées que celles des

<sup>412</sup> (Metcalf, 1983) p. 113 : « *Analysis of an abraded section of the edge of the coin should in theory discount surface effects, such as corrosion or surface enrichment, and should measure the unaltered alloy; in practice, however, it is a delicate and sometimes perhaps an impossible task, within the limitations of aesthetic damage, to obtain even an approximately correct result.* ».

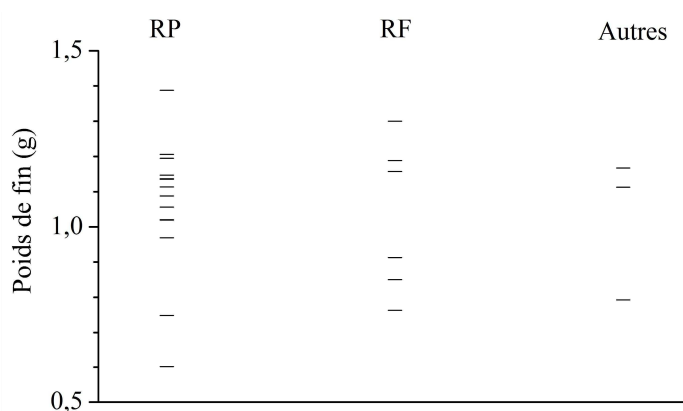
<sup>413</sup> (Lafaurie, 1963).



exemplaires à la légende RF<sup>414</sup>. Cette tendance ne se retrouve pas lors de l'étude du titre d'argent des pièces.

Nous verrons dans le paragraphe suivant que le début du règne de Charlemagne voit une baisse sensible du titre moyen par rapport à celui calculé pour l'ensemble des pièces de Pépin le Bref analysées. Les trois monnaies au nom de Pépin qui ne s'inscrivent ni dans le type RP ni dans le type RF portent au droit le nom du roi inscrit sous différentes formes et au revers la légende RxF. Cette typologie rappelle celle de certaines des émissions de Charlemagne antérieures à la réforme de 793/4, et les rapproche de la fin du règne de Pépin le Bref. Il est donc surprenant de voir que les deniers de ce dernier souverain qui seraient les plus tardifs sont les plus purs de ceux frappés durant l'ensemble de son règne, dans la mesure où ceux de Charlemagne qui viennent ensuite contiennent moins d'argent que les monnaies de Pépin le Bref.

Seul un nombre d'analyses plus conséquent permettrait de confirmer le regroupement des deniers de Pépin le Bref qui portent au droit son nom et au revers RxF, ou au contraire pourrait démontrer une répartition similaire à celle observée pour les pièces du type RP ou du type RF.



**Figure 115** - Représentation graphique du poids de fin dans les deniers de Pépin le Bref à la légende RP, RF ou d'un autre type au droit.

La représentation graphique du poids de fin contenu dans les deniers de Pépin le Bref du type RP, du type RF et des autres variantes (Figure 115) montre que la valeur intrinsèque moyenne pour chaque variété est similaire. Les moyennes sont de 1,06 g d'argent pour les deux principaux types, et de 1,02 g pour les trois monnaies au nom de Pépin au droit et à la légende RxF au revers. Bien que leur

<sup>414</sup> (Lafaurie, 1974) p. 42.

titre soit légèrement supérieur, la masse plus faible de ces trois deniers rapproche leurs poids de fin de ceux des deux principaux types de Pépin le Bref.

L'origine de la moitié des deniers de Pépin le Bref de notre *corpus* est incertaine ou inconnue. Cela complique l'étude des particularités régionales ou locales de ces pièces du point de vue du titre d'argent. Les moyennes sont identiques, égales à 92,0 % pour les deniers dont l'origine est identifiée comme pour ceux dont le lieu d'émission est incertain. Aucune particularité n'apparaît si l'on compare les titres des monnaies issues d'ateliers situés entre la Loire et la Seine ou au nord de la Seine.

Le monnayage de Pépin le Bref marque la réaffirmation du pouvoir royal sur la frappe monétaire. Il est parvenu à imposer son nom sur l'ensemble des pièces émises dans son royaume alors que le nom du souverain avait disparu des monnaies depuis plus de cinquante ans, et n'apparaissent qu'exceptionnellement depuis plus de cent ans<sup>415</sup>. Le titre d'argent des deniers analysés confirme le pouvoir exercé par le premier roi carolingien sur la frappe monétaire.

## **2. Carloman (768-771)**

Les deux deniers de Carloman de notre *corpus* présentent des titres d'argent élevés, respectivement de 89,5 % pour Prou 762 et de 94,3 % pour BnF 506a. La moyenne de ces deux valeurs est de 91,9 %, soit une valeur proche de celle calculée pour les exemplaires de Pépin le Bref de la période précédente (92,0 %). La rareté des monnaies de Carloman constitue un obstacle important à la poursuite des analyses de pièces de ce souverain, qui seraient toutefois indispensables pour que la pureté moyenne déterminée puisse être considérée comme représentative de l'ensemble de ces exemplaires.

## **3. Charlemagne (768-814)**

### ***a. Charlemagne Type 1 (768-771)***

Les teneurs en argent déterminées pour les monnaies du Type 1 de Charlemagne, frappées durant les années de règne conjoint avec Carloman entre 768 et 771, sont comprises entre 79 % et 93 %. Le nombre d'analyses est certes trop faible pour permettre de dresser des conclusions définitives quant à ces pièces, il semble cependant que les teneurs soient relativement dispersées (écart-type relatif de 5,5 %) et qu'un léger fléchissement soit observé depuis le règne de Pépin

---

<sup>415</sup> (Lafaurie, 1974) p. 43.

le Bref (Figure 116) : la moyenne des titres évolue ainsi de 92,0 % à 85,7 % seulement ; de plus, seule une des monnaies du Type 1 de Charlemagne analysées présente un titre supérieur à la moyenne de celles de Pépin le Bref.

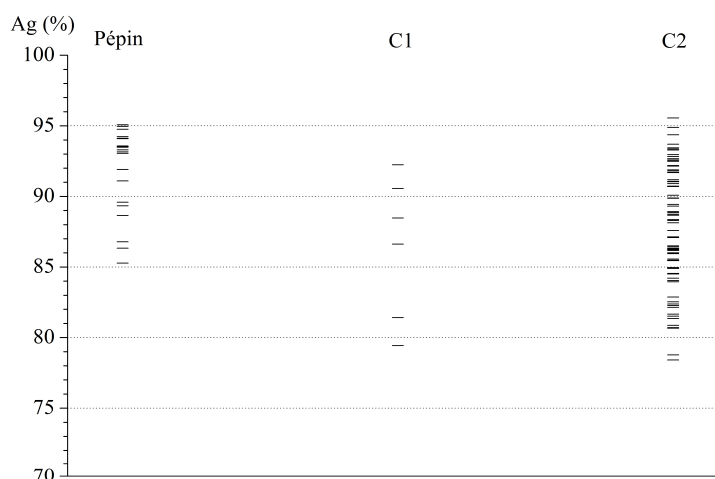
Par rapport aux deniers de Carloman, qui ont également été frappés entre 768 et 771, ceux du Type 1 de Charlemagne contiennent en moyenne moins d'argent (85,6 % contre 91,9 %). La faible représentativité des deux groupes de monnaies de ces types dans notre corpus incite à considérer cet écart avec prudence.

Seule une campagne d'analyse de deniers du Type 1 de Charlemagne plus importante pourrait permettre de confirmer la baisse sensible du titre depuis la période précédente et le léger écart observé avec les exemplaires de Carloman. La rareté de ces monnaies est cependant un obstacle majeur à une telle étude.

#### ***b. Charlemagne Type 2 (771-793/4)***

Le nombre important de monnaies du Type 2 de Charlemagne analysées dans le cadre de cette thèse, ainsi que la variété de leurs origines, permet d'envisager une étude représentative des exemplaires de la période 771-793/4.

Le titre d'argent moyen des quatre-vingt-trois deniers authentiques de ce type analysés est de 88,0 %. Les valeurs sont comprises entre 78 % et 96 %. La dispersion des teneurs, illustrée par l'écart-type relatif calculé sur l'ensemble des valeurs, est de 4,9 %.



**Figure 116** - Représentation graphique du titre d'argent des deniers de Pépin le Bref et des Types 1 et 2 de Charlemagne.

La moyenne des teneurs en argent pour le Type 2 de Charlemagne est comparable à celle calculée pour les monnaies du Type 1 de ce même souverain, ce qui confirme une baisse relative du titre moyen par rapport aux deniers de Pépin le

Bref. La Figure 116 montre l'évolution du titre d'argent des deniers pour Pépin le Bref (751-768), le Type 1 de Charlemagne (768-771) et le Type 2 de Charlemagne (771-793/4). On y distingue une répartition homogène des exemplaires analysés entre 80 % et 95 % d'argent pour le Type 2 de Charlemagne, alors que les valeurs pour Pépin le Bref sont comprises entre 85 % et 95 %, et que les deux tiers de ces pièces contiennent plus de 90 % de métal précieux.

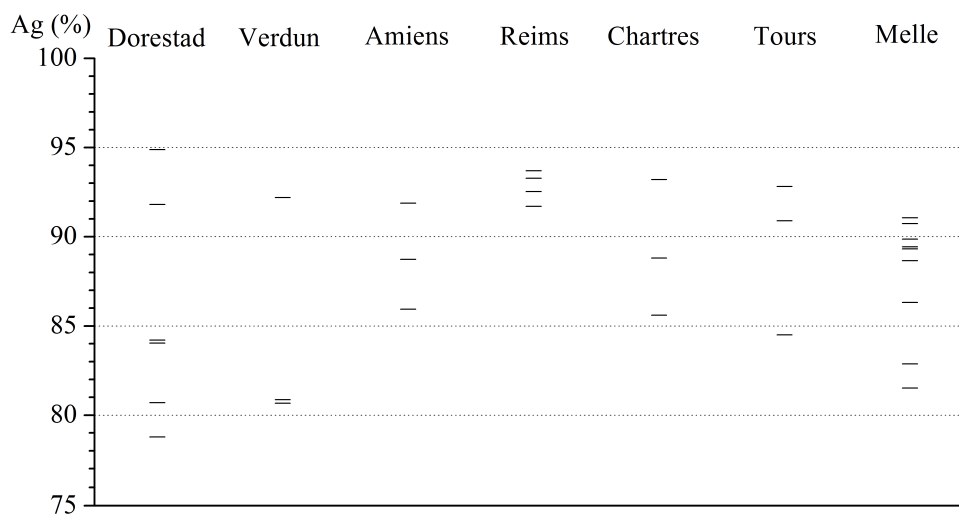
L'étude individuelle des titres des deniers issus d'ateliers pour lesquels des exemplaires de Pépin le Bref et des Types 1 et/ou 2 de Charlemagne ont été analysés confirme la tendance générale à la baisse lors du changement de souverain.

C'est le cas pour les exemplaires d'Amiens, Lyon, Chartres, Saint-Martin de Tours et Troyes. Une augmentation sensible est observée pour les deniers de Maastricht, tandis que les teneurs en argent restent similaires pour ceux de Reims et de Tours. Pour Verdun, deux des trois monnaies du Type 2 de Charlemagne analysées présentent un titre plus faible que celui du denier de Pépin de notre *corpus*, tandis que le troisième est sensiblement plus pur.

Le nombre de résultats pour chaque atelier est bien entendu trop faible pour que ces observations aient valeur de tendance générale propre à chaque officine.

Les ateliers représentés par au moins trois échantillons du Type 2 de Charlemagne ont été examinés particulièrement pour étudier d'éventuelles spécificités locales du titre des deniers.

Les deux cités pour lesquelles le nombre d'exemplaires de ce type sont les plus importants dans notre *corpus* sont Melle (9 échantillons) et Dorestad (6). Quatre exemplaires de Reims ont également été étudiés, ainsi que trois de Verdun, d'Amiens, de Chartres et de Tours. Pour Reims, les monnaies au nom de la ville et celles au nom de l'Eglise Notre-Dame ont été reportées ; il en est de même pour la Basilique Saint-Martin de Tours et l'Eglise Saint-Maurice de cette ville, et pour la cité d'Amiens et l'Eglise Saint-Firmin. Les résultats obtenus pour l'ensemble de ces ateliers sont reportés sur la Figure 117.



**Figure 117** - Représentation graphique du titre d'argent des deniers du Type 2 de Charlemagne des ateliers les plus représentés dans notre *corpus*.

Les deux ateliers les plus représentés que sont Melle et Dorestad montrent une répartition du titre des deniers à leurs noms qui correspond à celle de l'ensemble des exemplaires de ce type. Les moyennes respectives sont de 87,8 % et de 85,7 % d'argent. Les deniers de Dorestad en particulier couvrent la totalité de la gamme de teneurs en argent observée pour l'ensemble des exemplaires du Type 2 de Charlemagne, soit entre 78 % et 95 %.

Pour Verdun, les deux deniers sur lesquels la légende au revers est inscrite en cercle autour d'un globule présentent des titres sensiblement inférieurs à celui déterminé pour l'exemplaire du même atelier sur lequel le nom de lieu d'émission apparaît dans les cantons d'une croix (81 % environ contre 92 %).

Pour Amiens, les deux deniers au nom de l'Eglise Saint-Firmin contiennent moins d'argent que celui au nom de la ville, mais aucun regroupement net n'apparaît graphiquement (Figure 117).

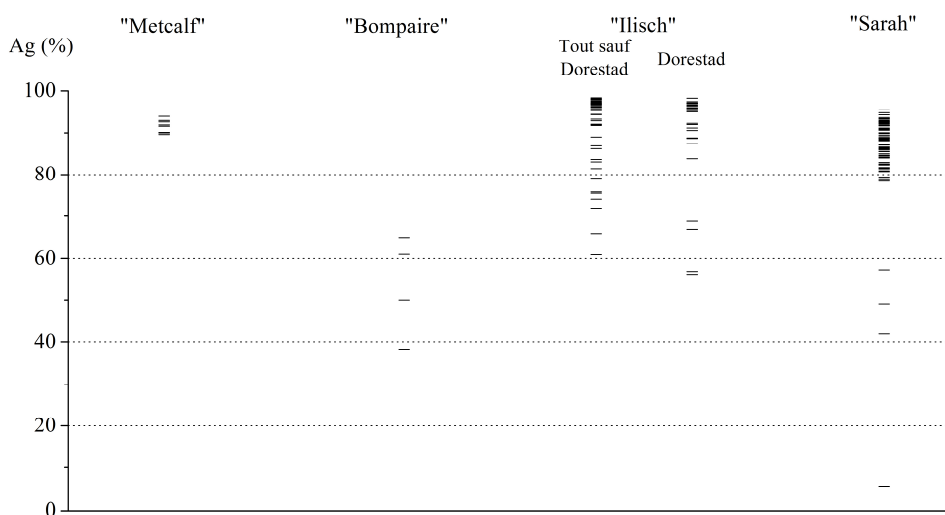
Les quatre valeurs obtenues pour les monnaies de Reims, qu'elles soient au nom de la cité ou à celui de l'Eglise Notre-Dame se regroupent entre 91 % et 94 %.

Le denier attribuable à Chartres sur lequel apparaît au revers un personnage (BnF 1988-135) contient plus d'argent (93,2 %) que les deux autres à la légende CARNOTAS en cercle (Prou 489 et BnF 489a, dont les titres respectifs sont de 85,6 % et 88,8 %). Si cette tendance reflète la réalité, cela pourrait traduire la baisse progressive du titre d'argent des monnaies de Charlemagne durant les périodes d'émission du Type 2 entre 771 et 793/4 : le type de revers de BnF 1988-135 est en effet identique à celui des exemplaires de Chartres de Pépin le Bref, ce qui suggère que celui-ci est le plus ancien des trois qui ont été analysés. Il ne s'agit toutefois que de conjectures.

Le denier au nom de l'Eglise Saint-Maurice de Tours est d'un titre de 85 % environ, inférieur de plus de 5 % à celui des deux pièces analysées de Saint-Martin de Tours.

Des différences ou au contraire des regroupements peuvent apparaître entre les titres des deniers d'un même atelier ou d'une même ville. Le nombre d'analyses de monnaies du Type 2 de Charlemagne pour chaque officine est trop faible pour que l'on puisse identifier des tendances réelles, à l'exception de celles de Melle et de Dorestad, pour lesquelles une variabilité similaire à celle observée pour l'ensemble des pièces analysées de cette période se dessine. Il semble donc que la quantité de cuivre ajouté ou les procédures de purification de l'argent aient varié au sein d'un même atelier durant les années de frappe des monnaies du Type 2 de Charlemagne.

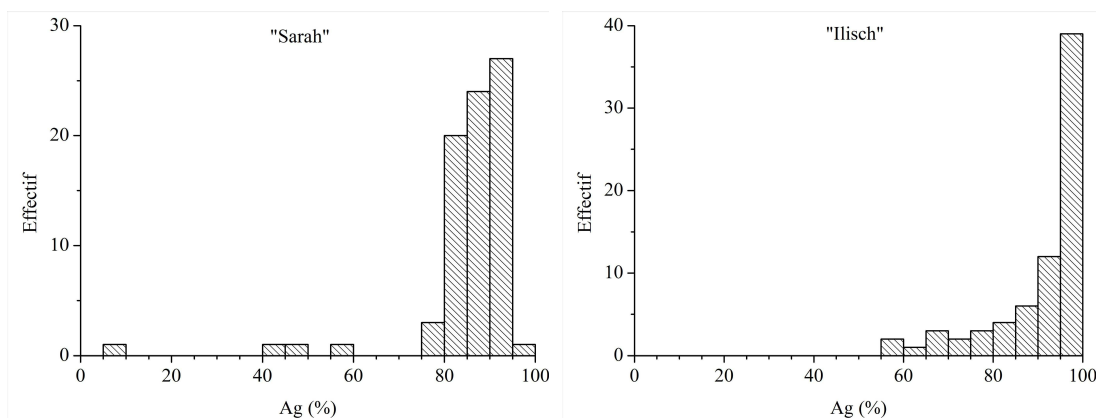
La comparaison des résultats obtenus par LA-ICP-MS sur les monnaies de Charlemagne antérieures à la réforme de 793/4 avec ceux publiés antérieurement pour des exemplaires de mêmes types<sup>416</sup> met en évidence des différences selon les publications considérées. La représentation graphique de l'ensemble des analyses de monnaies de Charlemagne des années 768-793/4 montre des variations très importantes selon les auteurs, qui influencent l'interprétation qui sera donnée aux résultats dans chaque cas (Figure 118).



**Figure 118** - Représentation des titres d'argent des monnaies de Charlemagne antérieures à la réforme de 793/4 (Types 1 et 2) publiés antérieurement ("Metcalf" pour (Metcalf et Merrick, 1967 ; Metcalf *et al.*, 1968 ; Metcalf et Northover, 1989), "Bompaire" pour (Bompaire et Depierre, 1989), "Ilisch" pour (Ilisch *et al.*, 2003)) et "Sarah" pour nos analyses. Les analyses des monnaies de Dorestad ont été séparées des autres pour "Ilisch".

<sup>416</sup> Voir *supra* p. 288.

Les analyses reprises de publications de Metcalf et de ses collaborateurs, ainsi que celles de Bompaire et Depierre, sont trop peu nombreuses pour permettre de tirer des conclusions définitives quant au titre des deniers de Charlemagne frappés avant 793/4. Pris individuellement, chacun des groupes de valeurs conduit à des conclusions diamétralement opposées : si l'on considère que ces quelques résultats peuvent être représentatifs, ceux de Metcalf montreraient un standard de pureté très élevé et des titres très proches, tandis que ceux de Bompaire et Depierre mettent en évidence des teneurs en argent faibles et très variables. Dans les deux cas, il est possible que les titres déterminés soient justes ; les deniers analysés dans chacune de ces deux études proviennent en effet d'ateliers différents. Pour les monnaies du trésor de Dijon, la faiblesse du titre du denier de Troyes est cohérente avec notre résultat d'analyse d'un exemplaire de cet atelier : la pièce de la BnF analysée dans le cadre de cette thèse contient 41,9 % d'argent (Prou 541) et a été considérée comme fautive, tandis que la teneur déterminée par Bompaire et Depierre est de 38 %<sup>417</sup>. En revanche, les monnaies de Paris (Prou 316 et BnF 316a), ainsi que celles de la Basilique Saint-Martin de Tours (BnF 439bis, Prou 440 et BnF 1976-70) que nous avons analysées contiennent de 85 % à 93 % d'argent environ, alors que les deux pièces de ces mêmes ateliers du trésor de Dijon étaient données à des titres de l'ordre de 60 %. L'interprétation des résultats obtenus pour les monnaies de ce trésor demeure donc problématique.



**Figure 119** - Histogrammes de répartition des titres des deniers de Charlemagne antérieurs à la réforme de 793/4 déterminés dans le cadre de cette thèse ("Sarah") et dans (Ilisch *et al.*, 2003) ("Ilisch").

Les résultats que nous avons obtenus pour les pièces de Charlemagne antérieures à la réforme de 793/4 semblent à première vue en bon accord avec ceux

<sup>417</sup> (Bompaire et Depierre, 1989) p. 581.

publiés par Ilisch à partir de monnaies du trésor de Pöschendorf. L'examen de la répartition des valeurs sous forme d'histogramme montre toutefois quelques différences (Figure 119).

La plus grande partie de nos teneurs en argent déterminées par LA-ICP-MS est répartie entre les trois intervalles de 5 % compris entre 80 % et 95 %. Seules quelques pièces présentent des titres en dehors de cette gamme. En revanche, les valeurs publiées par Ilisch montrent un regroupement des teneurs au-delà de 95 % d'argent. La différenciation des monnaies de Dorestad, qui constituent une proportion importante de l'ensemble des exemplaires publiés par cet auteur, montre que ce ne sont pas ces pièces qui influencent la répartition des teneurs en argent observées (Figure 118). Pour les monnaies analysées par Ilisch comme pour les nôtres, la tendance reste la même : une grande majorité des pièces de Charlemagne antérieures à la réforme est constituée d'un alliage argent-cuivre dont le titre est bon ou excellent. Quelques monnaies isolées présentent des titres inférieurs à 80 % d'argent, ce qui pourrait avoir justifié la réforme de 793/4 ainsi que le renforcement du contrôle des ateliers de frappe dans le but d'éliminer les fausses monnaies de la circulation et de standardiser le titre des deniers.

Nous verrons dans le paragraphe relatif aux émissions de la période 793/4-812 si les mesures prises par Charlemagne dans le Capitulaire de Francfort ont eu l'effet escompté.

### *c. Louis roi d'Aquitaine (781-793/4)*

Le trois deniers analysés au nom de Louis roi d'Aquitaine contiennent en moyenne 89,9 % d'argent. Les valeurs sont comprises entre 87,0 % et 91,5 %. Les deux deniers de Clermont et de Saint-Sulpice de Bourges présentent des titres légèrement supérieurs à 91 %, tandis que celui qui pourrait être de Saint-Romain de Blaye contient seulement 87,1 % de métal précieux.

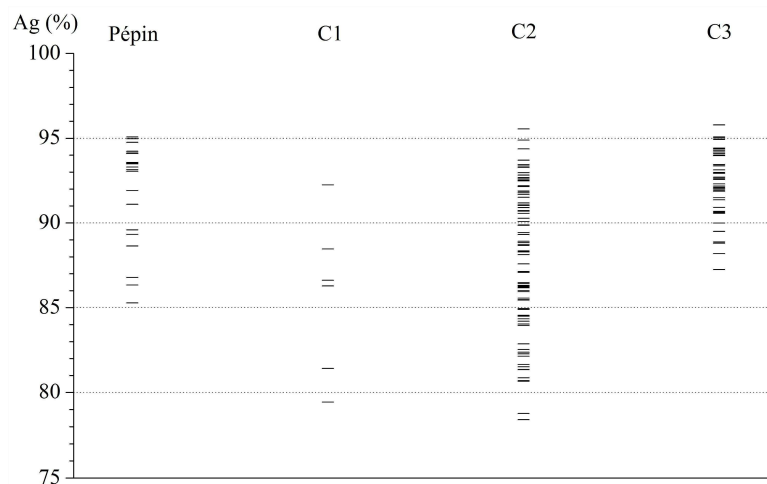
Le titre moyen des monnaies de Louis roi d'Aquitaine est conforme à ce qui a été observé pour les deniers contemporains du Type 2 de Charlemagne, bien que légèrement plus élevé (89,9 % contre 88,0 %). Un nombre d'analyses plus important d'exemplaires au nom de Louis roi d'Aquitaine permettrait de raisonner sur un échantillonnage plus représentatif que les trois pièces de notre *corpus*. Une caractérisation complète des pièces du trésor de Larino (19 deniers de ce souverain) serait des plus instructives pour contribuer plus largement à la connaissance des émissions monétaires de Louis roi d'Aquitaine. La comparaison entre le titre moyen des monnaies de Charlemagne du Type 2 et de celui des pièces de Louis roi d'Aquitaine aurait ainsi davantage de sens.



#### *d. Charlemagne Type 3 (793/4-812)*

Seuls sont discutés ici les résultats obtenus pour les deniers dont l'attribution à Charlemagne et à la période 793/4-812 est assurée. L'interprétation des analyses des deniers au monogramme des ateliers de Melle et de Bourges qui peuvent être associés à Charlemagne ou à Charles le Chauve apparaît dans une partie dédiée spécifiquement à cette problématique.

En dehors de Prou 576 de Sens dont le cas est discuté plus bas, les deniers au monogramme postérieurs à la réforme de Charlemagne de 793/4 (Type 3) qui ont été analysés contiennent entre 87,3 % et 95,8 % d'argent (92,4 % en moyenne). L'écart-type de 2,3 % montre une dispersion relativement faible des valeurs de titre.



**Figure 120** - Représentation graphique de l'évolution du titre d'argent des deniers depuis Pépin le Bref jusqu'au Type 3 de Charlemagne.

La comparaison avec les valeurs calculées pour les monnaies de Pépin le Bref et celles de Charlemagne des Types 1 et 2 antérieures à la réforme de 793/4 montre plusieurs évolutions (Figure 120). L'examen du titre moyen montre tout d'abord une augmentation sensible : les monnaies de Charlemagne frappées avant la réforme contenaient en moyenne 87,8 %, celles dont l'émission est postérieure plus de 92 %. Les bornes maximales sont inchangées, de l'ordre de 96 % dans les deux cas. Le titre le plus faible est en revanche nettement plus élevé : il augmente de près de 10 % lors de la réforme générale des poids et mesures de Charlemagne, passant de 78 % pour les monnaies des Types 1 et 2 confondues, à 87 % pour celles du Type 3 au monogramme. Ce décalage vers le haut de la borne inférieure est à l'origine de la dispersion moindre observée après la réforme de 793/4 : l'écart-type

relatif est ainsi réduit de plus de moitié, passant de 4,9 % pour les exemplaires de Charlemagne du Type 2 analysés à 2,3 % pour ceux du Type 3.

Du point de vue du titre, la réforme de Charlemagne de 793/4 semble donc marquer un retour à un standard d'argent élevé observé sous Pépin le Bref, après un léger déclin durant la première partie du règne de Charlemagne entre 768 et 793/4 (Figure 120). Outre l'élimination apparente des quelques fausses monnaies qui existaient durant la période précédente, les conséquences de la réforme de Charlemagne du point de vue monétaire peuvent être résumées ainsi : une augmentation et une uniformisation de la masse et du module des deniers ; une uniformisation des types de droit et de revers des pièces ; une augmentation et une uniformisation du titre d'argent des alliages monétaires. La confirmation de la hausse du titre des deniers, supposée mais pas encore véritablement justifiée, ainsi que l'uniformisation des valeurs de titre, confirment l'efficacité de la réforme de Charlemagne de 793/4 du point de vue de la frappe monétaire.

Les deux analyses chimiques de Mulazzani, ainsi que celles publiées par Ilisch pour des deniers du Type 3 de Charlemagne, ont révélé des titres d'argent comparables à ceux obtenus par LA-ICP-MS dans le cadre de cette thèse. Une différence apparaît si l'on considère les analyses de surface de Metcalf *et al.* : les deux deniers au monogramme carolin analysés par ces auteurs contiennent d'après eux près de 98 % d'argent. Il est légitime de penser que, dans ce cas, les analyses chimiques de Mulazzani sont fiables, mais que l'analyse de surface de Metcalf *et al.* a conduit à une surestimation du titre d'argent. Metcalf le reconnaîtra ultérieurement : « *Two Italian coins of Charlemagne's later coinage were analysed in 1968 and were found to be of the very highest silver standard. The XRF figures may overstate the case slightly.*<sup>418</sup> ».

Un des deniers au monogramme carolin analysé, et attribué à Charlemagne, présente un titre relativement faible : Prou 576 au nom de Sens contient 60,4 % d'argent seulement. Le titre nettement plus bas pour ce denier que celui des exemplaires du Type 3 de Charlemagne amène à considérer deux hypothèses : il peut soit s'agir d'un faux, soit d'une monnaie de Charles le Chauve et non de Charlemagne. Les émissions de Charles le Chauve de la période 840-864 contiennent en effet relativement peu d'argent, en moyenne 66,3 %. Cela rapprocherait donc Prou 576 des années 840-864, durant lesquelles certains ateliers ont frappé des pièces au monogramme carolin, plutôt qu'à la période d'émission

---

<sup>418</sup> (Metcalf et Northover, 1989) p. 108.

des exemplaires de ce type par Charlemagne, qui contiennent toutes au moins 87 % d'argent et en moyenne plus de 92 %.

Prou 576 a été attribué au règne de Charlemagne et non à celui de Charles le Chauve d'après Coupland, qui classe Sens parmi les ateliers monétaires qui ont frappé des monnaies au monogramme carolin uniquement sous Charlemagne et pas sous Charles le Chauve<sup>419</sup>. Des deniers de Sens sont présents dans certains des trésors datés de l'époque de Charles le Chauve. Leur légende au revers n'est toutefois pas SENONES CIVITA comme sur Prou 576 mais SENONES CIVITAS. De plus, ils ne portent pas de monogramme carolin sur leur revers mais un temple.

Aucun denier au monogramme carolin de Sens à la légende SENONES CIVITA n'est recensé dans la littérature<sup>420</sup>, ni pour Charlemagne, ni pour Charles le Chauve. S'agit-il d'une évolution dans l'écriture du nom de ville entre l'époque de Charlemagne et celle de Charles le Chauve, ou d'une erreur de gravure des coins ? Cela ne peut être déterminé. Il n'est pas donc inenvisageable que de telles pièces aient été frappées entre 793/4 et 812 d'une part, et à partir de 840 d'autre part, voire seulement après 840. Sens se trouve en effet dans le territoire de Charles le Chauve ; des monnaies au nom de ce souverain, au nom d'atelier dans le champ et au temple avant 864, et du Type GDR après cette date, ont en outre été frappées au nom de cette ville.

La composition de Prou 576 est très proche de celle des monnaies analysées de la Première période d'émission de Charles le Chauve (840-864) : leur titre moyen est de 60 % environ, et leurs teneurs en zinc élevées font penser à l'ajout de laiton à l'argent pour l'affaiblir. C'est donc cette période qui est la plus probable pour Prou 576 et les deniers au monogramme carolin de Sens à la légende SENONES CIVITA. Des analyses d'autres monnaies similaires permettraient de confirmer cette hypothèse et pourraient suggérer une révision de la datation proposée par Coupland pour ces exemplaires.

Certaines monnaies au monogramme carolin attribuées au Type 3 de Charlemagne portent au revers la légende SENNES comme mention de lieu d'émission. Les deux exemplaires de notre corpus Prou 40 et Prou 41 présentent cette caractéristique. Depeyrot comme Gariel proposent une attribution à Sens ; Coupland estime que les pièces qui portent cette légende ne peuvent être associés à un lieu d'émission de manière satisfaisante<sup>421</sup>. Si l'attribution à Sens de ces pièces est exacte, la chronologie d'émission suivante peut être proposée pour cet atelier :

---

<sup>419</sup> (Coupland, 2005) p. 218.

<sup>420</sup> Celui du trésor de Zelzate cité dans MG et repris par Depeyrot porte en réalité un temple et la légende SENONES CIVITAS (type de Prou 574). Voir (Naster, 1950) et Haertle.

<sup>421</sup> (Coupland, 2005) p. 221.

les premières monnaies qui auraient été frappées à Sennes seraient de Charlemagne et antérieures à la réforme de 793/4 ; il s'agit des exemplaires qui portent au revers la légende SEN dans le champ. Après cette date, des pièces au monogramme carolin y auraient été émises, portant la légende SENNES au revers. Les monnaies de Sens de Louis le Pieux sont bien identifiées, et le nom de la ville y apparaît sous la forme SENONES pour les Types 1 et 2 de cet atelier, entre 814 et 818, et entre 818 et 822/3. Lorsque la mention du lieu d'émission réapparaît sur les pièces après 840, sous Charles le Chauve en Francie Occidentale, les monnaies au temple portent la légende SENONES CIVITAS, et ceux au monogramme carolin SENONES CIVITA. Les pièces de Sens du Type GDR frappées par Charles le Chauve présentent un nom de lieu d'émission similaire, du type SENONES CIVITAS.

Il ne s'agit certes que d'hypothèses, qui ne sont toutefois contredites ni par l'étude des trésors, ni par l'analyse élémentaire. L'attribution des deniers au monogramme carolin à la légende SENNES à l'atelier de Sens n'est pas une certitude, mais elle semble constituer une proposition recevable, voire probable.

#### *e. Charlemagne Type 4 (812-814)*

Les trois deniers dont l'attribution au Type 4 de Charlemagne est indiscutable (Prou 981 à Prou 983) présentent des titres d'argent extrêmement élevés, compris entre 96,4 % et 97,7 %. Les trois valeurs déterminées sont très proches les unes des autres et de la moyenne (96,9 %).

Ces titres d'argent sont les plus élevés parmi ceux obtenus pour l'ensemble des monnaies de Charlemagne, tous types confondus. Si l'on considère la totalité des pièces analysées dans le cadre de cette thèse, seuls quelques deniers du Type 2 de Louis le Pieux (818-822/3) surpassent en pureté les monnaies du Type 4 de Charlemagne. La moyenne calculée pour ces deniers est la plus élevée pour toutes les périodes d'émissions carolingiennes considérées ici.

Ces trois analyses sont trop peu représentatives pour permettre de généraliser quant à l'ensemble des deniers au buste de Charlemagne émis entre 812 et 814. Leurs titres excellents et très peu dispersés permettent toutefois de supposer que le prestige de l'idéologie impériale véhiculé par la représentation du premier empereur d'Occident devait aller de pair avec une pureté extrême de l'argent constituant ces monnaies.

Le quatrième denier au buste et au nom de Charles de notre *corpus* Prou 972 doit, selon nous, être traité séparément des trois autres : sa forme irrégulière, et la gravure plus grossière du buste et des légendes, le justifient.

Cet exemplaire contient 93,9 % d'argent. Cette valeur est certes légèrement plus faible que celle déterminée pour les trois monnaies dont l'attribution au Type 4 de Charlemagne ne fait aucun doute, mais reste très élevée. L'analyse ne permet donc pas d'exclure l'association de Prou 972 aux années des émissions impériales de Charlemagne. Son titre élevé suggérerait même plutôt que cette attribution est juste. Si l'on inclut cet exemplaire pour le calcul des teneurs moyennes en argent et de l'écart-type relatif, ces deux valeurs sont respectivement de 96,2 % et 1,7 %. Les monnaies du Type 4 de Charlemagne restent donc les plus pures de l'ensemble de la période considérée, même en intégrant Prou 972.

#### **4. Louis le Pieux (814-840)**

##### *a. Louis le Pieux Type 1 (814-818)*

Le titre d'argent moyen des deniers au buste du Type 1 de Louis le Pieux est en déclin par rapport à celui des pièces immédiatement antérieures (Type 4 de Charlemagne), mais en légère augmentation si le dernier type pour lequel un nombre d'analyses significatif a été obtenu est pris en compte (Type 3 de Charlemagne)<sup>422</sup>.

La moyenne des teneurs en argent déterminées pour les deniers du Type 1 de Louis le Pieux est de 93,5 %, et les valeurs comprises entre 90,9 % et 96,3 %. L'écart-type sur les dix-huit teneurs en argent considérées – les deniers de Melle et les oboles exclus – est de 1,8 %, ce qui traduit une dispersion relativement faible des teneurs en argent des alliages monétaires. Cette valeur est du même ordre que celle calculée pour les deniers au monogramme du Type 3 de Charlemagne (2,3 %). L'écart-type déterminé à partir des titres des deniers au buste de Charlemagne n'a pas été pris en compte pour suivre l'évolution de cette donnée : le nombre d'analyses pour les pièces de ce type est en effet trop faible pour que l'on puisse considérer que cette valeur ait un sens.

Le nombre relativement restreint de deniers du Type 1 de Louis le Pieux ne permet pas d'étudier d'éventuelles particularités régionales de ces pièces du point de vue du titre, d'autant plus que les exemplaires de Melle et d'Italie sont traités séparément. Seule une tendance concernant les deniers à la légende chrétienne peut être observée en comparaison avec les autres deniers analysés.

Les trois deniers au nom de Louis le Pieux au buste et sur lesquels apparaît, non pas le nom de l'atelier de frappe au revers, mais la légende XPISTIANA

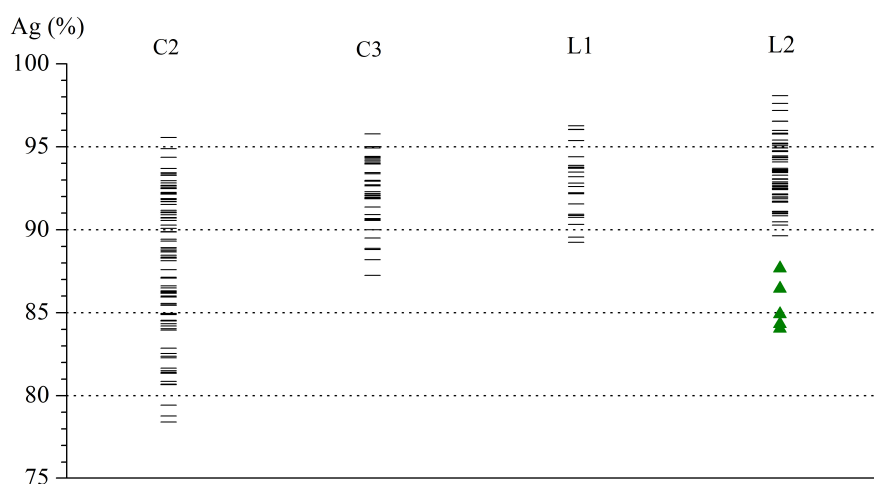
---

<sup>422</sup> Les monnaies de Melle du Type 1 de Louis le Pieux n'ont pas été considérées dans ce paragraphe : les titres des quatre deniers analysés les distinguent des autres exemplaires contemporains et justifient de les traiter séparément. Voir *infra* p. 370.

RELIGIO, et attribués à l'atelier du Palais impérial à Aix-la-Chapelle, présentent les trois valeurs de titre les plus élevées. A l'exception d'un denier de Pavie (Prou 901), les trois pièces au buste et à la légende chrétienne de Louis le Pieux sont les seules pour cette période qui présentent un titre supérieur à 94 %. Les teneurs en argent pour ces deniers s'élèvent à plus de 96 %, et sont très proches les unes des autres : leur dispersion est inférieure à 0,3 % absolus. Bien que le nombre de monnaies concernées dans les deux cas soit faible, une similarité peut être observée du point de vue du titre d'argent entre les deniers au buste de Charlemagne du Type 4 et ceux de Louis le Pieux du Type 1 à la légende chrétienne qui leur succèdent : dans les deux cas, les valeurs sont très élevées, supérieures à 96 %, et très proches les unes des autres. Cela pourrait confirmer l'attribution des deniers au buste de Louis le Pieux à la légende chrétienne à l'atelier du Palais.

#### ***b. Louis le Pieux Type 2 (818-822/3)***

L'étude de l'évolution du titre moyen entre les Types 1 et 2 de Louis le Pieux montre une stabilisation durant la première partie du règne de cet empereur (Figure 121) : les pièces frappées durant les années 818-822/3 contiennent en moyenne 93,5 % d'argent, comme celles émises entre 814 et 818. La dispersion des valeurs autour de cette moyenne est de plus similaire : les bornes minimale et maximale passent respectivement de 90,9 % à 89,6 % et de 96,3 % à 98,1 %, et l'écart-type relatif reste stable (1,8 % puis 1,9 %).



**Figure 121** - Représentation graphique de l'évolution du titre des deniers des Types 2 et 3 de Charlemagne et des Types 1 et 2 de Louis le Pieux. Mise en évidence des monnaies de titre faible du Type 2 de Louis le Pieux (triangles verts).

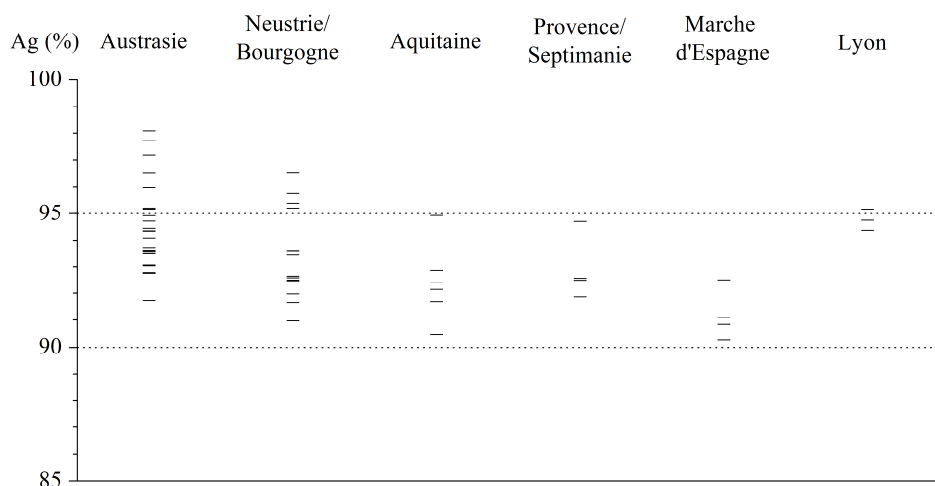
Cinq monnaies, au-delà de celles considérées comme fausses, ont toutefois été exclues de ces calculs et observations. Il s'agit de Prou 446 de Tours, Prou 796 et Prou 797 de Dax, Prou 886 de Marseille et Prou 904 de Pavie. Ces cinq deniers se distinguent des autres par la faiblesse relative de leur titre : ils contiennent en effet entre 84 % et 88 % d'argent, alors que les autres – soixante-dix échantillons – présentent des titres supérieurs à 90 % environ. Cela nous a paru remarquable car un tel phénomène n'était pas apparu pour les monnaies des Types 1 de Louis le Pieux et 3 de Charlemagne (Figure 121). La différence n'est toutefois pas apparue suffisamment importante pour que le terme de « faux » soit approprié. La similarité de la composition de la monnaie de Pavie avec celles de la même période au nom de Venise, en particulier du point de vue de certains éléments-traces, nous a incité à intégrer cet échantillon au paragraphe spécifique aux monnaies vénitiennes frappées au Type 2 de Louis le Pieux<sup>423</sup>. Pour la même raison, les cas des deux pièces de Dax et de celle de Tours sont également traités à la suite des pièces de Venise. Le second exemplaire du même type au nom de Tours présente un titre d'argent de l'ordre de la moyenne calculée pour les deniers du Type 2 de Louis le Pieux (93,6 %). Aucune explication satisfaisante ne permet de justifier la faiblesse du titre de l'exemplaire de Marseille.

Le nombre important de deniers du Type 2 de Louis le Pieux permet d'étudier d'éventuelles particularités régionales du point de vue du titre d'argent. Les exemplaires de Melle, de Venise et d'Italie sont traités séparément et n'apparaissent pas ici ; les cinq deniers mentionnés plus haut du fait de la faiblesse relative de leur titre d'argent ont également été exclus de cette réflexion. Cinquante-sept deniers répartis dans six groupes selon leur origine géographique ont été étudiés selon cette approche.

La Figure 122 représente le titre des deniers du Type 2 de Louis le Pieux selon leur origine dans l'empire carolingien. Les six régions définies sont les suivantes : Austrasie, qui regroupe des exemplaires aux noms du Palais, de Mayence, Strasbourg, Dorestad, Cologne, Cambrai, Trèves, Verdun, Quentovic, Reims et *Aldunheim* (23 exemplaires au total) ; Neustrie/Bourgogne : Paris, Meaux, Rouen, Tours, Orléans, Sens et Nantes (14) ; Aquitaine : « Aquitaine », Bourges, Bordeaux et Toulouse (7) ; Provence/Septimanie : Narbonne, Vienne et Arles (5) ; Marche d'Espagne : Ampurias, Barcelone et Roda (5) ; Lyon (3).

---

<sup>423</sup> Voir *infra* p. 413.



**Figure 122** - Représentation graphique du titre d'argent des deniers du Type 2 de Louis le Pieux selon leur région d'origine. Les exemplaires de Melle, d'Italie et de Venise n'apparaissent pas.

L'examen de la Figure 122 semble montrer que le titre d'argent des deniers du Type 2 de Louis le Pieux s'amenuise à mesure que l'on s'éloigne du cœur du territoire carolingien. La moyenne calculée pour les exemplaires d'Austrasie est de 94,2 %. Les pièces de Neustrie et de Bourgogne contiennent en moyenne 93,5 % d'argent, ce qui correspond à la valeur déterminée pour les deniers de ce type de l'ensemble de l'empire. La moyenne des teneurs en argent pour les deniers frappés aux noms des ateliers étudiés situés en Aquitaine, à l'exception de ceux de Melle, est de 92,2 % ; elle est de 93,3 % pour les ateliers de Provence et de Septimanie, et atteint 91,2 % seulement pour la Marche d'Espagne. Lyon constitue une exception : les exemplaires analysés du Type 2 de Louis le Pieux présentent un titre moyen supérieur à tous les autres groupes régionaux, de 94,8 %. Les trois valeurs déterminées pour ces pièces sont de plus très regroupées.

La tendance observée, certes à partir de quelques exemplaires seulement pour certains groupes, semble toutefois bien réelle : à mesure que l'on s'éloigne du cœur historique du territoire carolingien que constitue l'Austrasie, la pureté d'argent des deniers décroît progressivement. La différence est légère mais semble toutefois marquée pour la Neustrie, sous domination austrasienne depuis la fin du VII<sup>e</sup> siècle. Les moyennes les plus faibles concernent les territoires récemment conquis d'Aquitaine, de Provence et de Septimanie, et de la Marche d'Espagne. Cela pourrait traduire un contrôle moins strict des ateliers monétaires les plus éloignés du pouvoir central, et souligner une intégration progressive du point de vue de la frappe monétaire des régions conquises relativement récemment au territoire carolingien historique. Les deniers de Lyon se distinguent cependant : ils



présentent le titre moyen le plus élevé, bien que cette ville soit relativement éloignée du cœur austrasien du territoire de Louis le Pieux.

Concernant le titre moindre des deniers issus des ateliers de Septimanie et d'Aquitaine, l'influence arabe résiduelle dans ces territoires situés en marge du de l'empire carolingien pourrait être une explication. Les trouvailles de monnaies arabes dans ces deux régions répertoriées par Parvérie mettent en évidence selon cet auteur un flux important « *de l'Espagne musulmane vers le sud-ouest de la Gaule carolingienne*<sup>424</sup> ». Les trouvailles en Septimanie, qui fut une province d'Al-Andalus, sont majoritairement des pièces de cuivre, tandis que celles d'Aquitaine, qui n'a jamais été dominée par les Arabes, sont essentiellement des dirhams d'argent. L'Aquitaine n'aurait jamais été réellement maîtrisée par les Carolingiens selon ce même auteur. Ces éléments historiques semblent donc cohérents avec l'observation du titre d'argent des monnaies du Type 2 de Louis le Pieux dans les deux provinces du sud-ouest de l'empire carolingien.

Plusieurs éléments d'ordre numismatique avaient permis de supposer que la première partie du règne de Louis le Pieux était caractérisée par un contrôle strict de la frappe et de la circulation monétaires. En premier lieu, la quasi-absence de monnaies étrangères découvertes sur le territoire carolingien prouve que l'interdiction de la circulation de ces monnaies était scrupuleusement respectée, sous Charlemagne mais plus encore sous Louis le Pieux<sup>425</sup>. D'autre part, l'étude des trésors démontre une efficacité remarquable dans le renouvellement des monnaies en circulation lors des changements de type monétaire, et ce malgré la faible durée d'émission de certains types. L'homogénéité des trouvailles de cette époque est en effet exceptionnelle : quand elles ne sont pas totalement absentes, seules quelques rares monnaies du type antérieur coexistent avec celles constituant le type en circulation. Enfin, la composition des trésors démontre une circulation rapide des pièces à travers l'ensemble de l'empire<sup>426</sup>. Les résultats analytiques présentés plus haut apportent la confirmation de ces observations purement numismatiques : en ce qui concerne la frappe monétaire, Louis le Pieux ne fut pas comme on l'a longtemps cru l'héritier indigne de Charlemagne<sup>427</sup>, mais, du moins au début de son règne, il est parvenu à maintenir voire à renforcer le contrôle exercé par son prédécesseur sur la monnaie. Le portrait politique de Louis le Pieux durant les premières années de son règne proposé par Riché confirme ce qui ressort

---

<sup>424</sup> (Parvérie, 2008). Voir également (Duplessy, 1956) et (Moesgaard, 2008).

<sup>425</sup> Pour les trésors de l'époque de Charlemagne voir (Coupland, 2005) p. 221, pour ceux de Louis le Pieux voir (Coupland, 1990) p. 24 et p. 32-33.

<sup>426</sup> (Coupland, 1990) p. 24 et (McCormick, 2001) p. 683.

<sup>427</sup> Voir à ce sujet l'introduction dans (Coupland, 1990) p. 23.

de l'étude des monnaies des points de vue numismatique et analytique : l'empereur dépeint est volontaire et réformateur<sup>428</sup>.

*c. Louis le Pieux Type 3 (822/3-840)*

La collection de monnaies du Type 3 de Louis le Pieux de la BnF n'a pas été étudiée de manière exhaustive du point de vue analytique. L'interprétation des résultats n'a donc d'autre vocation que de suggérer des tendances dont la confirmation passe par l'analyse d'un échantillonnage plus large.

La moyenne des titres d'argent déterminés pour les monnaies du Type 3 de Louis le Pieux, en dehors de celles attribuées à Venise, est de 88,7 %. Les teneurs mesurées s'échelonnent de 81 % à 94 %. L'écart-type relatif calculé sur l'ensemble des valeurs est de 4,2 %.

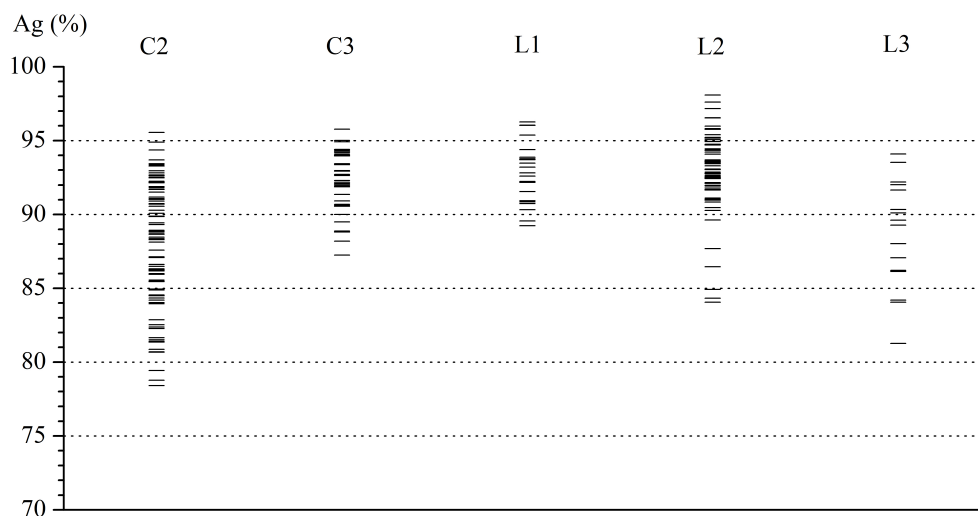
Par rapport aux deniers des Types 1 et 2 des années 814-818 et 818-822/3, la baisse du titre moyen est sensible, de 93,5% à 87,3 %. Les valeurs moyenne, minimale, maximale, ainsi que l'écart-type relatif rappellent davantage celles calculées pour le Type 2 de Charlemagne antérieur à la réforme de 793/4, que celles obtenues pour le Type 3 de ce même souverain et pour les deux premiers de Louis le Pieux. La représentation graphique des résultats est plus parlante encore que les valeurs individuelles (Figure 123). L'uniformisation des droit et revers des monnaies pour l'ensemble des émissions carolingiennes, qui semble trouver son aboutissement pour les deniers du Type 3 de Louis le Pieux sur lesquels l'indication de provenance a disparu, n'est pas corrélée à une poursuite de l'uniformisation des titres des alliages monétaires. C'est au contraire une légère régression qui est observée : après les progrès dans l'amélioration de la pureté des deniers et de l'uniformisation de leur composition initiés par Charlemagne et poursuivis au début du règne de Louis le Pieux, les pièces des années 822/3-840 semblent révéler un relâchement du contrôle des ateliers monétaires.

Aucune corrélation ne peut être mise en évidence entre l'origine supposée des deniers selon la classification de Coupland<sup>429</sup> et leur teneur en argent. Si des différences existent réellement, le nombre d'analyses de monnaies de chaque atelier est sans doute trop faible pour que cela apparaisse.

---

<sup>428</sup> (Riché, 1983) p. 167 et suivantes.

<sup>429</sup> (Coupland, 1990) p. 40-45.



**Figure 123** - Représentation de l'évolution du titre d'argent des deniers par type monétaire entre 771 et 840, du Type 2 de Charlemagne au Type 3 de Louis le Pieux.

L'examen de la Figure 123 met en évidence une information importante quant au nombre d'analyses nécessaires pour obtenir des données représentatives. Malgré un nombre d'analyses très différent, les gammes de teneurs définies pour les titres des deniers du Type 2 de Charlemagne (70 résultats) et pour ceux du Type 3 de Louis le Pieux (16) sont très proches. Si l'on compare les titres obtenus pour les pièces des Types 1 et 3 de Louis le Pieux pour lesquels le nombre d'échantillons est similaire (autour de vingt), on constate que la variabilité des valeurs est double pour le type le plus tardif. Cela montre que vingt résultats environ permettent d'obtenir des données représentatives pour l'étude d'une problématique : pour les Types 1 et 3 de Louis le Pieux, la variabilité des titres d'argent observée semble correspondre à la réalité de la frappe monétaire. Ce nombre d'analyses est donc suffisant pour définir la gamme des teneurs des monnaies frappées durant la période étudiée.

Les événements politiques de la seconde partie du règne de Louis le Pieux ne sont sans doute pas étrangers au déclin du titre des monnaies à partir de 822/3<sup>430</sup>.

Louis le Pieux a déjà trois fils lorsqu'il s'unit en 819 avec sa nouvelle épouse Judith. La naissance d'un quatrième héritier mâle en 823, le futur Charles le Chauve, fait craindre à Lothaire une révision des dispositions prises par l'empereur quant à sa succession. Le fils aîné de Louis le Pieux était en effet associé à l'empire depuis 817, soit trois ans seulement après l'accession au trône de son père, afin

<sup>430</sup> D'après (Riché, 1983) p. 167-181.

d'éviter la division du territoire à sa mort. Les frères cadets de Lothaire, Pépin et Louis, avaient eux été investis du titre de roi, respectivement d'Aquitaine et de Bavière.

C'est en 829 que Louis le Pieux et Judith décident d'attribuer un territoire à leur jeune fils Charles. Selon les termes de Riché, l'empereur « *paraît alors à son apogée*<sup>431</sup> ». Les troubles apparaissent en 830, lorsque Lothaire entreprend de régner seul à la place de son père qui s'enfuit à Barcelone. Louis le Pieux retrouve son titre en 831 et partage alors l'empire en vue de sa succession de manière équitable entre ses quatre fils Lothaire, Louis, Pépin et Charles. Lothaire ne tarde pas à reformer une coalition et, avec l'aide du pape en 833, oblige son père à renoncer « spontanément » à ses fonctions impériales et l'oblige à expier ses fautes. La guerre civile reprend peu après ; Lothaire est vaincu et, en 835, Louis le Pieux retrouve son titre d'empereur. Le découpage du territoire en vue de sa succession est à nouveau revu entre 837 et 839 mais, à la mort du second empereur carolingien en 840, de nouvelles querelles éclatent entre les héritiers. Ce n'est qu'en 843 lors du partage de Verdun qu'un accord est trouvé entre les différentes parties.

L'instabilité politique des dix dernières années du règne de Louis le Pieux n'est sans doute pas étrangère au fléchissement du titre des deniers observé pour le Type 3 de ce souverain. Il n'est pas possible d'établir si les monnaies qui présentent la plus grande pureté ont été frappées durant les années de calme entre 822/3 et 829, et si la baisse du titre est directement liée aux événements des années 830-840. Les troubles politiques internes ne sont probablement pas seuls en cause : l'influence des attaques des peuples nordiques qui apparaissent dès les années 830 dans le nord du territoire carolingien n'est sans doute pas à négliger.

Devroey déduit de l'histoire des villes et du commerce des cycles de croissance et de déclin qui mettent en évidence une phase ascendante durant la période 775-830, puis une décroissance jusqu'en 850/860<sup>432</sup>. Un parallèle semble donc pouvoir être établi entre notre interprétation des résultats des analyses concernant l'évolution de la pureté des monnaies carolingiennes et les cycles de croissance détectés par Devroey à partir d'autres données.

Une campagne d'analyses de grande ampleur de monnaies du Type 3 de Louis le Pieux, qui s'appuierait de manière critique sur la classification proposée par Coupland, et qui tienne compte des événements politiques et de la situation de chacune des villes abritant les ateliers monétaires concernés, serait des plus instructives pour une meilleure compréhension de la frappe monétaire dans l'empire carolingien entre 822/3 et 840.

---

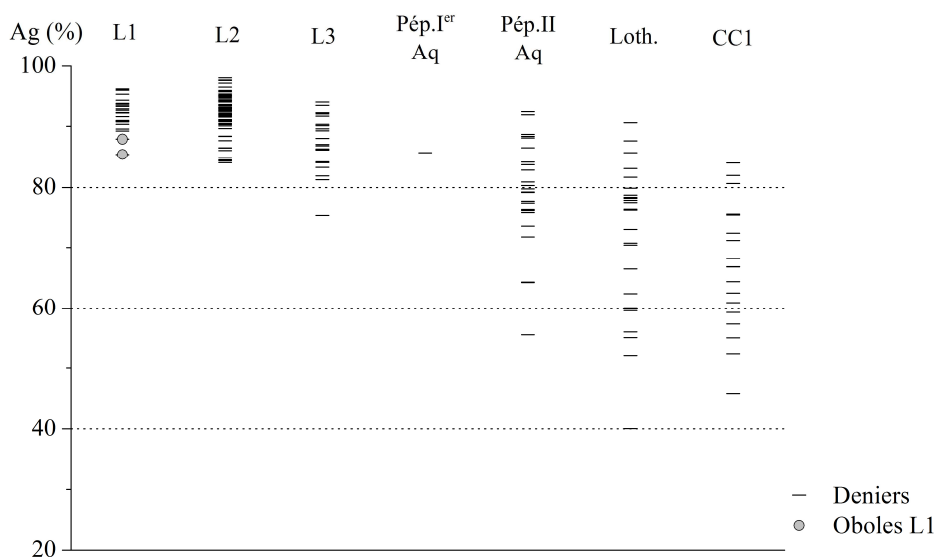
<sup>431</sup> (Riché, 1983) p. 173.

<sup>432</sup> (Devroey 2006), p. 351.

## 5. Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine (817-838)

La seule monnaie analysée de Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine est Prou 665. Les pièces de ce type auraient été frappées autour de 818 pour célébrer son accession au trône en 817<sup>433</sup>. Elles auraient rapidement été éliminées de la circulation lors de l'introduction du type au nom d'atelier dans le champ au revers (Type 2 de Louis le Pieux) en remplacement du type au buste (Type 1 de Louis le Pieux) en 818. C'est donc aux monnaies du Type 1 de Louis le Pieux, voire celles du Type 2 de cet empereur, que les pièces de Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine doivent être comparées du point de vue de leur composition chimique.

Le titre d'argent de Prou 665 est de 85,7 %, valeur certes élevée mais sensiblement plus faible que les moyennes des monnaies des Types 1 et 2 de Louis le Pieux, de 93,5 % dans les deux cas. La teneur en argent de l'exemplaire de Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine analysé est plus faible de près de 4 % de celle du denier du Type 1 de Louis le Pieux le moins pur. Pour ce même type monétaire, Prou 665 est plus proche des oboles de Melle et de Toulouse analysées, qui contiennent entre 85 % et 88 % d'argent, que des deniers (Figure 124).



**Figure 124** - Comparaison du titre d'argent de l'exemplaire Prou 665 supposé de Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine avec celui des monnaies des Types 1, 2 et 3 de Louis le Pieux, de celles de la Première période d'émission de Charles le Chauve et de celles de Pépin II d'Aquitaine.

Par rapport aux monnaies du Type 2 de Louis le Pieux, celle de Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine est à rapprocher des cinq exemplaires qui constituent un groupe dont le titre, compris entre 84 % et 88 % d'argent, est légèrement plus faible que les autres.

<sup>433</sup> (Coupland, 1989) p. 189.

Contrairement à Coupland, Grierson et Blackburn proposent une datation des monnaies du type de Prou 665 aux années 840-841, et donc une attribution à Pépin II plutôt qu'à Pépin I<sup>er</sup> d'Aquitaine<sup>434</sup>. La comparaison de Prou 665 avec les pièces du Type 3 de Louis le Pieux, immédiatement antérieur à l'émission de cet exemplaire si l'on suit l'hypothèse de MEC, montre une bonne cohérence du point de vue du titre d'argent : la pureté de cette monnaie au nom de Pépin d'Aquitaine est en effet similaire à la moyenne des titres des monnaies au temple de Louis le Pieux analysées (85,7 % contre 88,7 %). La comparaison du titre de Prou 665 avec celui des autres pièces au nom de Pépin d'Aquitaine, qui seraient très vraisemblablement toutes de Pépin II, ne permet pas d'exclure cette hypothèse (Figure 124). Cela pourrait suggérer que l'hypothèse de Grierson et Blackburn est plus probable que celle de Coupland, bien que l'argumentation développée par ce dernier numismate pour justifier une attribution à Pépin I<sup>er</sup> plutôt qu'à Pépin II d'Aquitaine soit convaincante<sup>435</sup>.

#### **6. Pépin II d'Aquitaine (839-852)**

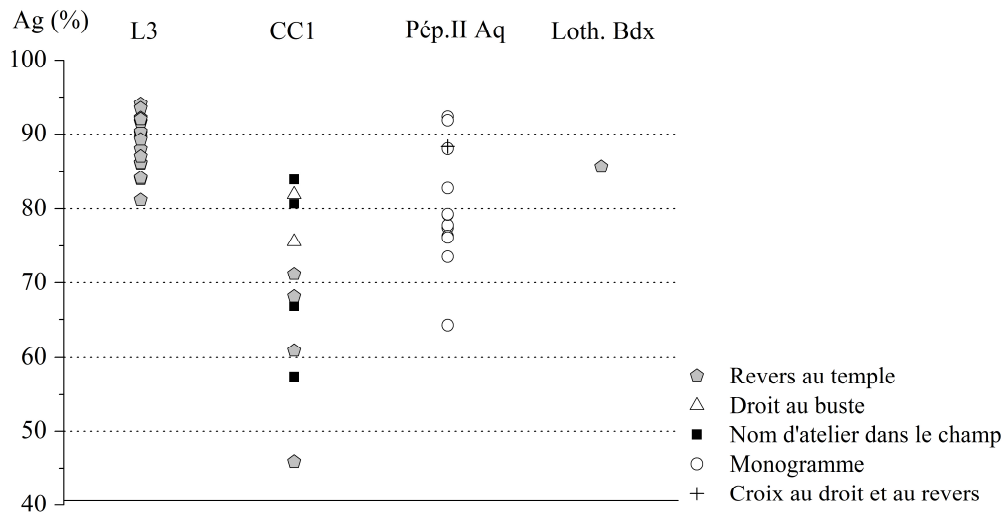
Les quatorze deniers analysés attribués à Pépin II d'Aquitaine contiennent en moyenne 80,8 % d'argent. Les valeurs sont dispersées, comprises entre 64 % et 93 %, et l'écart-type relatif est relativement élevé (8,3 %).

Les années d'émission des monnaies de Pépin II d'Aquitaine, vraisemblablement de 845 à 848, incitent à comparer leur titre moyen à celui des pièces de la première période d'émission de Charles le Chauve (840-864). Des similarités typologiques, ainsi que l'existence d'ateliers ayant frappé aux noms de ces deux souverains, permettent de pousser plus avant la comparaison.

---

<sup>434</sup> MEC p. 219.

<sup>435</sup> (Coupland, 1989) p. 198-199.



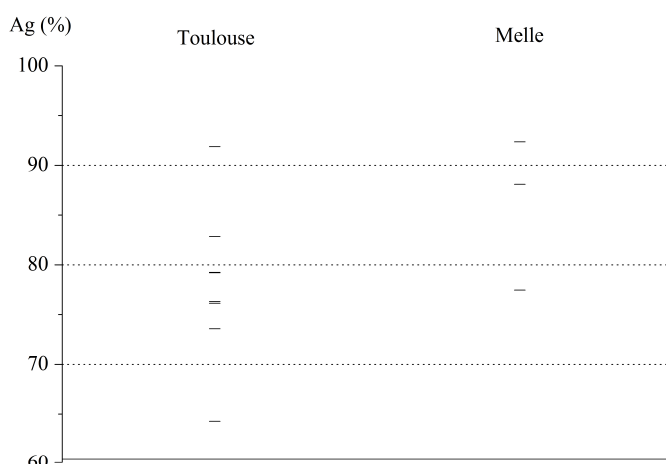
**Figure 125** - Comparaison du titre d'argent des deniers de Pépin II d'Aquitaine avec ceux des exemplaires du Type 3 de Louis le Pieux, de la Première période d'émission de Charles le Chauve et de Prou 790 de Lothaire frappé à Bordeaux.

D'un point de vue global, les deniers de Pépin II d'Aquitaine sont plus purs que ceux de la première période d'émission de Charles la Chauve : les titres moyens sont respectivement de 80,8 % et de 66,3 %. La moyenne de titre pour les deniers de Pépin II d'Aquitaine est légèrement inférieure à celle déterminée pour les exemplaires du type 3 de Louis le Pieux (88,7 %). La dispersion des valeurs est également intermédiaire entre celles qui caractérisent les émissions de la fin du règne de Louis le Pieux (822/3-840) et de la Première période de Charles le Chauve (840-864) : les valeurs respectives pour ces deux monnayages sont de 4,2 % et de 17,0 %, et celle pour les deniers de Pépin II d'Aquitaine de 8,3 %.

La confrontation de ces valeurs avec les périodes d'émission respectives de chacun de ces monnayages pourrait suggérer que l'argent relativement pur constituant les deniers du Type 3 de Louis le Pieux aurait été progressivement affaibli après sa mort en 840 : les valeurs obtenues pour les pièces de Pépin II d'Aquitaine pourraient témoigner du début du déclin du titre moyen des alliages monétaires, et de l'augmentation de leur dispersion, durant les années 840. Les titres déterminés pour les monnaies de la Première période d'émission de Charles le Chauve concernent des exemplaires frappés entre 840 et 864, à l'exception des années durant lesquelles les frappes ont porté le nom de Pépin II pour certains ateliers. On peut donc imaginer que les refontes à partir de la fin du règne de Louis le Pieux en 840 ont progressivement contribué à affaiblir leur teneur en métal noble entre 840 et 864.

Les deux ateliers pour lesquels un nombre significatif de deniers au nom de Pépin II d'Aquitaine sont ceux de Melle et de Toulouse (respectivement trois et huit exemplaires). Il s'agit de plus de pièces du type au monogramme pippinide dans les deux cas. Nous pouvons donc ainsi proposer une comparaison du titre d'argent de ces pièces frappées durant les mêmes années et dont la variété de type est la même (Figure 126).

Les moyennes de titre pour les deniers analysés de Pépin d'II d'Aquitaine sont de 77,9 % pour Toulouse et de 86,0 % pour Melle. Les bornes maximales sont comparables, de l'ordre de 92 %, tandis que les bornes minimales sont légèrement différentes : le denier toulousain le moins pur contient 64,3 % d'argent, et le mellois 77,5 %. Les écarts-types relatifs relativement importants, de l'ordre de 10 % dans les deux cas, mettent en évidence une grande dispersion des valeurs de titre pour des deniers d'un même type et issus d'un même atelier, durant une période relativement courte.



**Figure 126** - Comparaison du titre d'argent des deniers au monogramme de Pépin II d'Aquitaine aux noms de Toulouse et de Melle. des teneurs

Coupland remarque l'ouverture de nouveaux ateliers en Aquitaine durant le règne de Pépin II, et interprète cela comme un relâchement de l'autorité royale sur la frappe monétaire<sup>436</sup>. Ce n'est pas ce que traduisent les premières analyses de deniers de ce souverain : si la tendance observée reflète la réalité de la frappe monétaire en Aquitaine entre 845 et 848, il semble que cette zone de l'ancien empire carolingien ait maintenu un standard de titre d'argent plus élevé que le reste de la Francie Occidentale et de la Francie Médiante. La régionalisation de l'économie dans les différentes parties de l'Aquitaine semble toutefois bien réelle,

<sup>436</sup> (Coupland, 1989) p. 217.



comme le démontre Coupland à partir de l'étude des trésors<sup>437</sup>. Cela marque une évolution importante par rapport au règne de Louis le Pieux qui se caractérise, du moins pour la première partie durant laquelle l'origine des pièces peut être tracée grâce à la mention du lieu d'émission sur leur revers, par une circulation rapide des monnaies à travers l'ensemble du territoire carolingien.

Le denier de Bordeaux au nom de Lothaire Prou 790 aurait en réalité été frappé par son allié Pépin II d'Aquitaine pour supporter son oncle dans sa tentative de reconnaissance du titre impérial<sup>438</sup>. Il convient donc davantage de comparer le titre d'argent de cet exemplaire à celui des monnaies de Pépin II d'Aquitaine (Figure 125) plutôt qu'à celles de Lothaire, bien que ce soit ce dernier nom qui apparaisse sur son droit.

Prou 790 contient 85,7 % d'argent. Cette valeur est proche de la moyenne calculée pour les deniers de Pépin II d'Aquitaine analysés (80,8 %). Elle est en revanche relativement éloignée de celle déterminée pour l'ensemble des exemplaires de Lothaire étudiés (70,8 %) ou des seuls deniers au temple qui portent le nom de ce souverain et du même type que Prou 790 (69,7 %). Il semble donc que l'étude du titre d'argent abonde dans le sens de l'hypothèse de Coupland, et que les monnaies au nom de Lothaire frappées à Bordeaux soient bien le fait de Pépin II d'Aquitaine, bien qu'aucun denier au temple de ce souverain ne soit inclus dans notre *corpus*.

## 7. Lothaire (840-855)

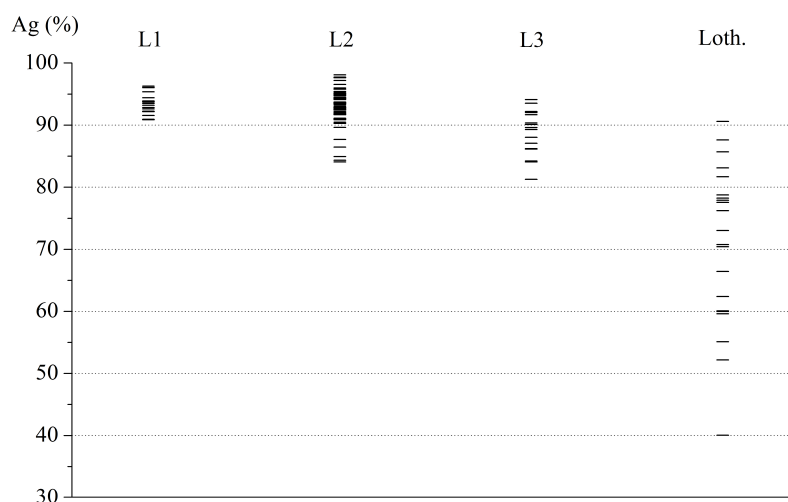
Les pièces au nom de Lothaire de notre *corpus* présentent un titre d'argent moyen de 70,8 %. Les valeurs sont comprises entre 40,0 % et 90,6 % ; l'écart-type relatif est de 18,4 %.

Une chute importante de la pureté des alliages est donc visible depuis le Type 3 de Louis le Pieux immédiatement antérieur : les bornes minimale et maximale pour les pièces de ce type sont en effet respectivement de 81 % et de 94 % d'argent, et la moyenne de 88,7 %. L'augmentation très nette de l'écart-type relatif, qui passe de 5,3 % à 18,4 %, montre une dispersion bien plus importante du titre des monnaies sous Lothaire (Figure 127) .

---

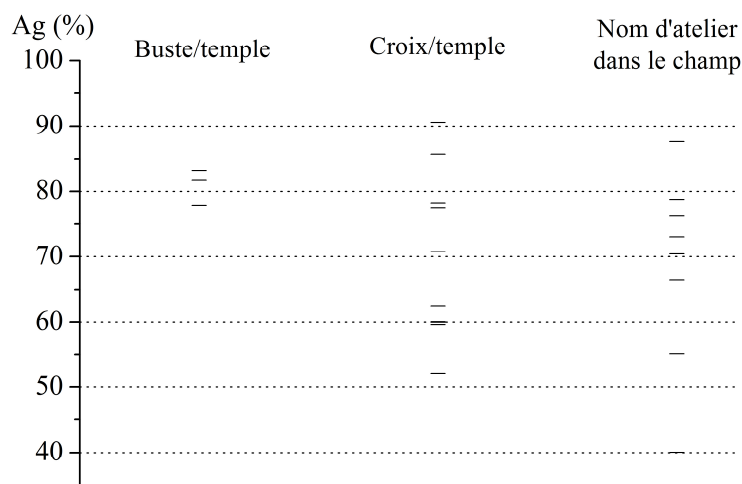
<sup>437</sup> (Coupland, 1989) p. 217-218.

<sup>438</sup> (Coupland, 1989) p. 203.



**Figure 127** - Représentation graphique du titre d'argent des deniers des Types 1, 2 et 3 de Louis le Pieux, et de Lothaire.

Malgré un nombre total de monnaies de Lothaire analysées relativement restreint et les réserves que cela induit, des tendances régionales ou typologiques méritent d'être observées du point de vue du titre d'argent.



**Figure 128** - Représentation des titres d'argent des monnaies de Lothaire par type.

Les deniers au nom de Lothaire sur lesquels apparaît un buste au droit présentent des teneurs en argent relativement élevées en comparaison avec les monnaies des autres types de ce même souverain (Figure 128). Ils contiennent en moyenne plus de 80 % d'argent, tandis que cette valeur est inférieure à 70 % pour les exemplaires des deux autres types, à la croix et au temple, et au nom d'atelier dans le champ. Seuls trois deniers de Lothaire au buste ont été analysés, néanmoins le regroupement de leurs titres mérite d'être mentionné. La période d'émission de

ces pièces proposée par Coupland<sup>439</sup> peut être une explication de leur pureté relative : si ces deniers ont réellement été frappés en 823 ou en 833/4, c'est-à-dire durant les années correspondant à celles de l'émission des pièces du Type 3 de Louis le Pieux, une similarité apparaît du point de vue du titre pour ces deux monnayages qui seraient contemporains. Les deniers au buste de Lothaire contiennent en effet 80,9 % d'argent en moyenne, et ceux au temple du Type 3 de Louis le Pieux présentent un titre moyen légèrement plus élevé de 87,3 %. Des analyses complémentaires de pièces de même type seraient nécessaires pour confirmer cette tendance, mais il apparaît d'après ces premiers résultats que l'analyse élémentaire pourrait confirmer la datation de l'émission des deniers de Lothaire au buste de 823, ou du moins des années de règne de Louis le Pieux.

L'émission des monnaies frappées en dehors du royaume de Francie Médiante au nom de Lothaire à Tours, Bordeaux et « Aquitaine » daterait selon Lafaurie et Coupland des années 840-843<sup>440</sup>, durant lesquelles les héritiers de Louis le Pieux ont combattu avant de s'accorder lors du partage de Verdun. Le titre du denier de Bordeaux analysé (85,7 %) le rapproche des pièces du Type 3 de Louis le Pieux, tandis que celui de l'obole au nom d'Aquitaine (66,4 %) est similaire à ce qui a été observé pour les émissions plus tardives, qu'elles soient de Lothaire ou de Charles le Chauve. Cela est bien entendu insuffisant pour proposer une datation précise de la frappe des monnaies de ces deux types. L'hypothèse de Coupland d'une frappe des monnaies de Lothaire au nom d'Aquitaine au sein de l'atelier de Bordeaux est toutefois affaiblie par nos analyses – certes peu représentatives – qui montrent un écart de titre de l'ordre de 20 % absolus.

Les trois monnaies à la croix et au temple issues des ateliers de Metz, Verdun et Trèves, seuls étudiés en dehors de Dorestad pour la zone nord du territoire de Lothaire dans laquelle des ateliers sont identifiés, présentent des titres proches les uns des autres, de l'ordre de 60 %. Ici encore, seules des analyses complémentaires d'autres exemplaires permettraient de confirmer la proximité du titre des deniers issus de ces ateliers.

Les deniers au nom de Dorestad représentent à eux seuls plus du tiers de l'ensemble de ceux de Lothaire analysés, issus de huit ateliers différents au moins. Les différences typologiques qui existent parmi les pièces de Dorestad datées du règne de Lothaire ne peuvent être corrélées à des particularités de titre : les gammes

---

<sup>439</sup> Voir (Coupland, 1988b) p. 45-48, (Coupland, 2001) p. 161-164 et *supra* p. 243.

<sup>440</sup> (Lafaurie, 1983) p. 141 et (Coupland, 2001) p. 168.

de teneurs sont très larges pour les deux types différents, et les moyennes comprises entre 65 % et 70 % pour les deniers au nom d'atelier dans le champ comme pour ceux à la croix et au temple.

Les résultats des analyses effectuées dans le cadre de cette thèse sur les deniers aux noms de Lothaire et de Dorestad ne recourent pas ceux obtenus par le passé sur des monnaies similaires. Metcalf et Northover avaient en effet déterminé des titres d'argent supérieurs à 93 % pour les deux pièces dont une est supposée officielle par les auteurs, et l'autre qualifiée de possible imitation frisonne sur la base des observations issues de MEC pour les exemplaires 1.818 et 1.819<sup>441</sup>. La troisième monnaie, considérée comme une imitation frisonne, ne contenait que 61 % de métal précieux (MEC 1.820). Nos analyses ne confirment pas les résultats de Metcalf et Northover. Au contraire : les monnaies que la légende non dégénérée a fait qualifier d'émissions officielles par Grierson et Blackburn (Prou 69 et Prou 70) contiennent, d'après nos analyses, respectivement 55 % et 40 % d'argent. L'écart avec les 93 % mesurés par Metcalf et Northover est donc conséquent. Les trois pièces qui répondent aux critères définis dans MEC pour identifier les imitations frisonnes (Prou 71 à Prou 73) contiennent entre 70 % et 90 % d'argent. Enfin, les monnaies analysées par nos soins qui pourraient être des imitations selon Grierson et Blackburn présentent des titres très variables, compris entre 50 % et 90 % d'argent. Seul un des trois échantillons se rapproche des 93 % obtenus par les auteurs britanniques pour une pièce similaire.

Ce sont donc finalement les pièces considérées comme officielles parmi celles que nous avons analysées qui présentent en moyenne les titres les plus faibles, et les « imitations » pour lesquelles l'alliage est globalement le plus pur. Nos conclusions sur le monnayage de Lothaire sont donc contradictoires de celles de Metcalf et Northover : ces auteurs avaient déduit de leurs trois analyses de pièces au nom de ce souverain, parmi lesquelles une qualifiée d'imitation, que « *Dorestad, which was subjected to persistent Viking attacks from 834 onwards, was nevertheless still able, under Lothar, to strike coins of the highest quality.*<sup>442</sup> ». La compréhension du monnayage de Lothaire au nom de Dorestad semble au regard de nos analyses plus complexe que cela.

Si effectivement des monnaies aux noms de Lothaire et de Dorestad ont été émises en dehors de cette ville par une autre autorité, et éventuellement après le règne de Lothaire, il semble que la dégénérescence des légendes ne soit pas un critère qui permette de les identifier. Ou bien faut-il imaginer que l'ensemble de ces pièces, officielles comme imitations, présente des titres d'argent très variables.

---

<sup>441</sup> (Metcalf et Northover, 1989) p. 115 et p. 118-119.

<sup>442</sup> (Metcalf et Northover, 1989) p. 120.

Malgré le nombre très important de monnaies au nom de Dorestad dans les trouvailles de l'époque de Lothaire, tout semble indiquer que les années 840 marquent le début du déclin du comptoir de la mer du Nord<sup>443</sup>. Le premier raid nordique visant Dorestad date de 834, et la destruction du comptoir remonterait à 863<sup>444</sup>. Les annales dites de Saint-Bertin rapportent que Lothaire aurait donné Dorestad et les régions environnantes au chef Danois Rorik en 850<sup>445</sup>. Coupland avance que Lothaire aurait récompensé les Danois qui avaient attaqué Dorestad à son instigation durant la fin du règne de Louis le Pieux en leur offrant la ville dès son accession au trône de Francie Médiane en 843<sup>446</sup>. Lothaire aurait alors rapidement repris le contrôle du comptoir déclinant, avant que Rorik ne revienne en 850 avec une flotte importante pour s'y réinstaller.

La complexité de la situation de Dorestad durant le règne de Lothaire, ainsi que celle de l'étude numismatique des pièces qui portent le nom de cet atelier, et de l'interprétation de leurs analyses, nous encouragent à la prudence.

Les deux monnaies de Lothaire authentiques issues d'ateliers italiens (Prou 904 de Pavie et Prou 910 de Milan) contiennent entre 75 % et 80 % d'argent. Le nombre d'analyses est trop restreint pour que la proximité des valeurs de titre de ces pièces italiennes puisse être opposée à la dispersion des autres deniers de Lothaire frappés en dehors de cette zone. Un nombre d'analyses plus conséquent de pièces de Lothaire frappées en Italie est indispensable pour évaluer véritablement le titre moyen et la dispersion des valeurs pour ces émissions, et les comparer aux deniers contemporains du nord du territoire de Lothaire, ainsi qu'à celles antérieures de Louis le Pieux et à celles postérieures de Louis II d'Italie.

Si l'on excepte les émissions italiennes, pour lesquelles un titre moyen plus élevé et des valeurs plus homogènes pourraient être révélés par des analyses complémentaires, la pureté des monnaies de Lothaire contraste avec celle des exemplaires carolingiens antérieurs : la baisse de la teneur moyenne en argent est très nette, et les valeurs déterminées extrêmement dispersées, montrent que l'idée de standard de titre d'argent ne peut s'appliquer aux émissions de ce souverain. La

---

<sup>443</sup> Coupland date le « boom » économique de Dorestad d'après l'étude des trésors des années 820, et l'amorce de son déclin des années 840. (Coupland, 2002) p. 225 et suivantes. L'archéologie fait remonter la régression de l'*emporium* à 830 environ. Voir (Van Es et Verwers, 1980) p. 297 et (Hodges et Whitehouse, 1996) p. 149-150.

<sup>444</sup> C'est du moins de cette année que date la dernière mention qui en est faite. Les monnaies de Lothaire sont de plus les dernières connues au nom de Dorestad.

<sup>445</sup> (Grat *et al.*, 1964) p. 59.

<sup>446</sup> (Coupland, 1988a) p. 5.

tendance à la baisse de la pureté des deniers et à l'augmentation de la dispersion des valeurs semble s'être amorcée durant les années d'émission du Type 3 de Louis le Pieux (822/3-840) ; c'est toutefois sous Lothaire à partir de 840 que ce phénomène s'amplifie, et traduit indiscutablement un relâchement du contrôle des ateliers monétaires en Francie Médiane.

L'interprétation historique des résultats de nos analyses de monnaies de Lothaire converge avec celle effectuée par Coupland sur la seule base des données numismatiques<sup>447</sup>. La variété des types monétaires et des titres impériaux dans les légendes, la baisse de la masse des deniers et la régionalisation de la circulation monétaire qui ressort de l'étude des trésors, sont les principaux facteurs avancés par ce numismate pour justifier de l'affaiblissement du contrôle impérial sur la fabrication monétaire depuis le règne de Louis le Pieux. Les conclusions de Coupland pourraient être les nôtres, tant les résultats des analyses pratiquées sur les monnaies de Lothaire corroborent les données numismatiques : « *The picture of Lothar's coinage which has emerged here is of a currency in poor condition and under limited imperial control.*<sup>448</sup> ». Le constat de Hodges et Whitehouse pour l'empire carolingien dans son ensemble, et pour sa partie italienne est également instructif<sup>449</sup>. A l'insécurité liée aux invasions de peuples nordiques, par les fronts de la mer du Nord, de la Manche et de l'Atlantique, faisaient écho à partir des années 830 les incursions musulmanes en Méditerranée : les possessions byzantines en Méditerranée Occidentale en furent les premières victimes, la Sicile d'abord, puis les côtes italiennes<sup>450</sup>. Le sac de la Basilique Saint-Pierre de Rome en 846 entraîna une offensive de Lothaire contre les Arabes<sup>451</sup>. La menace resta toutefois réelle jusqu'à la fin du IX<sup>e</sup> siècle. Les événements historiques pourraient donc justifier que le titre d'argent des monnaies ait commencé à décliner fortement en Italie plus tard que dans le reste de la Francie Médiane et qu'en la Francie Occidentale, peut-être à partir du règne de Louis II d'Italie seulement.

---

<sup>447</sup> (Coupland, 2001) p. 191-193.

<sup>448</sup> (Coupland, 2001) p. 191.

<sup>449</sup> (Hodges et Whitehouse, 1996) p. 106 : « *A la même époque [à partir de 835], les Sarrasins du Maghreb se mirent à attaquer la Sicile, de même que les centres côtiers byzantins, bénéventins ou pontificaux d'Italie du sud. Vers 830 l'héritage impérial et culturel laissé par Charlemagne était donc sérieusement menacé. A peine dix ans plus tard l'Occident était dans un état de bouleversement comparable à bien des égards à celui qui avait suivi la mort de Valens à Andrinople.* ».

<sup>450</sup> (Hodges et Whitehouse, 1996) p. 153.

<sup>451</sup> (Hodges et Whitehouse, 1996) p. 155-156.

## 8. Charles le Chauve (840-877)

### *a. Charles le Chauve Première période (840-864)*

L'interprétation des teneurs en argent pour les types monétaires de Charles le Chauve dont l'émission a commencé entre 840 et 864 n'est destinée qu'à esquisser des tendances générales. Le faible nombre de monnaies analysées datées de cette période, combiné à une grande variété de types et à des incertitudes quant à la chronologie de leur émission, nous incitent à étudier essentiellement l'évolution globale du titre d'argent pour ces deniers.

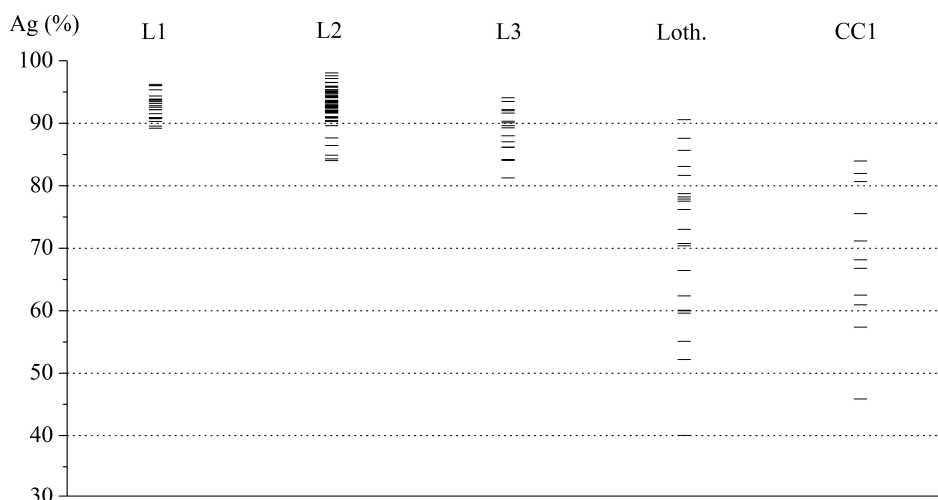
Les onze analyses de deniers dont la frappe durant la période 840-864 est attestée, semblent suffisantes pour mettre en évidence deux phénomènes : la baisse très nette du titre moyen, ainsi que l'augmentation de la variabilité des teneurs en argent par rapport aux périodes précédentes. La moyenne des teneurs en argent calculée pour les deniers de trois des cinq types définis par MEC<sup>452</sup> est de 68,6 % seulement. Les valeurs sont comprises entre 45,9 % et 84,0 %, et l'écart-type relatif calculé pour l'ensemble des teneurs est de 17,0 %.

Les monnaies de Charles le Chauve antérieures à l'édit de Pîtres analysées présentent du point de vue du titre d'argent des caractéristiques proches de celles observées pour celles de Lothaire : par rapport aux pièces du Type 3 de Louis le Pieux, dont les lieux d'émission étaient communs aux deux royaumes évoqués ici, la dispersion des titres devient très importante, et leur moyenne chute de manière visible (Figure 129). Les pièces de notre *corpus* frappées en Francie Médiane contiennent entre 40,0 % et 90,6 % d'argent ; l'écart-type relatif est de 18,4 %. Il semble donc que la pureté des monnaies ait évolué de manière parallèle dans les royaumes de Francie Occidentale et de Francie Médiane après la mort de Louis le Pieux en 840 (Figure 129).

Dans les deux royaumes, la variété des types monétaires en circulation, qu'ils soient encore frappés ou qu'il s'agisse d'émissions de la période précédente, va de pair avec la variabilité et la faiblesse des titres des alliages. L'étude de la composition des trésors monétaires converge donc avec les résultats des analyses concernant la pureté de l'argent qui constitue les monnaies.

---

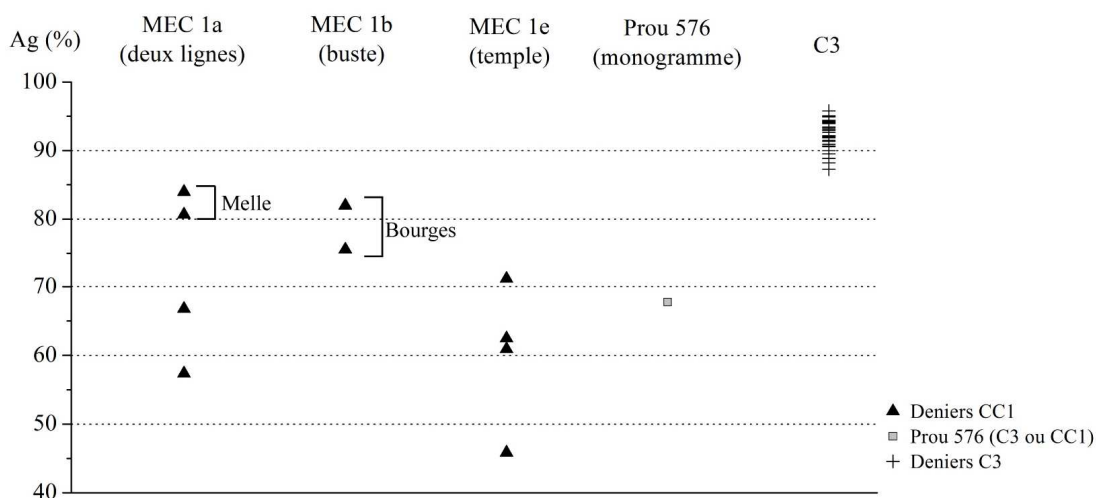
<sup>452</sup> MEC 1a à MEC 1e. Voir MEC p. 232.



**Figure 129** - Représentation de l'évolution du titre des monnaies des trois types de Louis le Pieux, de celles de Lothaire et de celles de Charles le Chauve antérieures à l'édit de Pîtres.

Bien que le cas des exemplaires de Melle soit traité séparément, une remarque doit être énoncée ici pour une meilleure compréhension des titres obtenus pour les monnaies de Charles le Chauve antérieures à 864. Contrairement aux pièces au monogramme carolin issues de cet atelier, et dont la période d'émission ne peut être définie individuellement avec précision, les deniers mellois à la légende en deux lignes au revers (Type MEC 1a) peuvent être datés avec assurance des années 840-864. Parmi l'ensemble des monnaies analysées de cette variété et de cette période, ces deux deniers de Melle présentent les titres les plus élevés : ils contiennent en effet entre 80 % et 85 % d'argent, tandis que les titres des autres sont compris entre 50 % et 70 % seulement. Les points correspondant à ces deux deniers de Melle sont bien visibles sur la Figure 130. La tendance des exemplaires mellois des années 840-864 à la légende en deux lignes à contenir davantage d'argent que les autres mériterait d'être confirmée par des analyses complémentaires d'autres deniers de Melle et de ce type, et de monnaies de la même période issus d'autres ateliers.





**Figure 130** - Représentation du titre des monnaies de Charles le Chauve antérieures à 864 par sous-type d'après MEC p. 231-232. Le denier Prou 576 attribué au Type 3 de Charlemagne et les autres de cette période apparaissent également.

L'examen des teneurs en argent pour les trois types monétaires de Charles le Chauve de la période 840-864 étudiés montre une légère différence du point de vue du titre d'argent (Figure 130). Les deux deniers au buste de l'atelier de Bourges (Type MEC 1b) présentent des titres plus élevés que la plupart des exemplaires des autres variétés : les deux deniers analysés contiennent entre 75 % et 85 % d'argent, en moyenne 78,8 %. Ces deux exemplaires sont les plus purs de l'ensemble de ceux analysés pour la Première période d'émission de Charles le Chauve, avec les deux deniers de Melle à la légende en deux lignes (Figure 130). Ces quatre exemplaires sont les seuls pour la période 840-864 dont le titre d'argent excède 75 % ; parmi les autres deniers contemporains des types MEC 1a (nom d'atelier en deux lignes au revers) et MEC 1c (au temple au revers), seul un présente une pureté supérieure à 70 %.

Si l'on considère la totalité des deniers analysés, ceux à la légende en deux lignes contiennent en moyenne 72,2 % d'argent et ceux au temple au revers 61,8 %. La différence semble toutefois due aux titres supérieurs des deux deniers de Melle Prou 726 et Prou 727 mentionnés dans le paragraphe précédent et mis en évidence sur la Figure 130. Si ces deux exemplaires sont mis à part, les moyennes sont proches, respectivement de 62,1 % pour les deniers à la légende en deux lignes au revers et 61,8 % pour ceux au temple. Il semble donc au vu de ces résultats que les deniers Melle et de Bourges constituent une exception, et que les exemplaires des autres ateliers présentent des titres d'argent très variables et centrés sur une valeur de l'ordre de 60 %.

Enfin, la représentation du titre du denier de Sens Prou 576 sur la Figure 130 montre clairement que cet exemplaire doit être rapproché des pièces de la

Première période d'émission de Charles le Chauve (840-864) plutôt qu'au Type 3 de Charlemagne (793/4-812), pour lequel les exemplaires analysés sont en moyenne purs à plus de 93 %. Une révision de son attribution à Charles le Chauve nous semble donc envisageable, d'autant plus que l'étude des trésors ne contredit pas cette hypothèse<sup>453</sup>.

Coupland avait remarqué une évolution du titre d'argent des monnaies de la Première période d'émission de Charles le Chauve en faisant coïncider sa proposition de chronologie avec les teneurs déterminées par Metcalf sur des exemplaires des différents types de cette période<sup>454</sup>. Les monnaies au temple et à la légende chrétienne (MEC 1e), premières à être frappées selon ce numismate, seraient les plus pures en argent. Les exemplaires du type monétaire suivant, au temple et au nom d'atelier (MEC 1e), présenteraient des titres inférieurs, mais toutefois meilleurs que les deniers à la légende en deux lignes au revers (MEC 1a), au buste (MEC 1b) ou à la porte de ville (MEC 1c), qui apparaîtraient ensuite selon Coupland.

La Figure 131 présente nos résultats ainsi que ceux de Metcalf, regroupés d'après le classement chronologique proposé par Coupland. Il semble que les résultats de Metcalf combinés aux nôtres convergent vers une tendance générale à une dispersion importante du titre des monnaies de la Première période d'émission de Charles le Chauve, quel qu'en soit le type. Les moyennes des teneurs en argent pour les trois groupes définis d'après la chronologie de Coupland sont respectivement de 76,6 % pour les deniers au temple et à la légende chrétienne, de 63,1 % pour ceux au temple et au nom d'atelier, et de 69,8 % pour les autres types pour lesquels des résultats sont disponibles (nom d'atelier dans le champ et porte de ville).

La moyenne de titre des deniers du type au temple et à la légende chrétienne est plus élevée que celle déterminée pour ceux au temple et au nom d'atelier, et ceux des autres variétés frappées durant la Première période d'émission de Charles le Chauve. Les titres de quatre des deniers analysés par Coupland est supérieur à 75 %. Pour les autres variétés, les moyennes calculées sont plus faibles, de l'ordre de 60 % à 70 %. Le titre moyen déterminé pour les exemplaires au temple et au nom d'atelier est toutefois inférieur à celui calculé pour ceux des autres variétés des années 840-864, et supposés postérieurs par Coupland. La baisse progressive du titre d'argent des deniers durant la Première période d'émission de

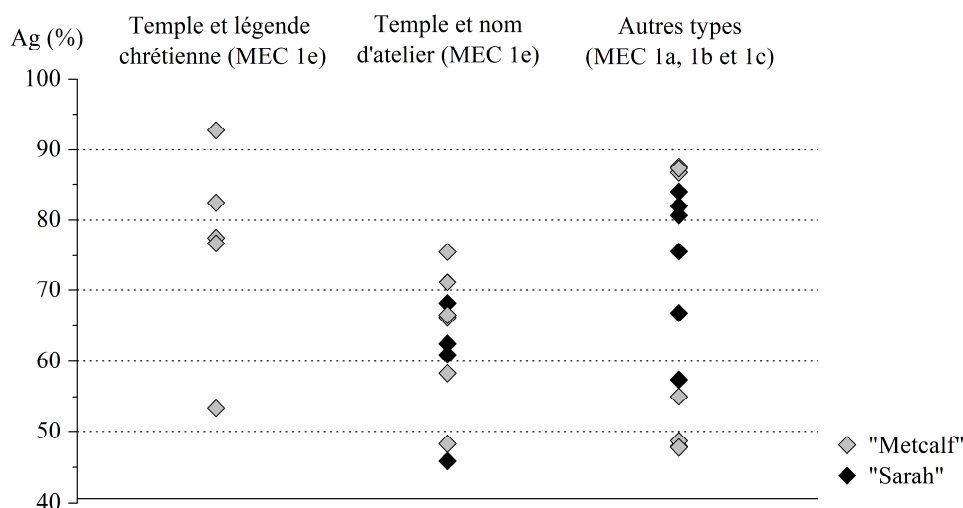
---

<sup>453</sup> Voir également sur ce denier *supra* p. 320.

<sup>454</sup> (Coupland, 1991) p. 151 et (Metcalf et Northover, 1989) p. 114-115.

Charles le Chauve ne serait donc pas concomittante avec l'évolution typologique proposée par Coupland.

Ces observations ne remettent pas en cause ni ne confirment la chronologie des émissions monétaires de la Première période d'émission de Charles le Chauve. L'examen conjoint de nos résultats et de ceux de Metcalf pour des exemplaires des mêmes types montre toutefois que la tendance à une baisse du titre des deniers pour la période 840-864 en Francie Occidentale est commune aux différents types monétaires. Des analyses complémentaires de monnaies de la Première période d'émission de Charles le Chauve au temple et à la légende chrétienne sont nécessaires pour confirmer le titre supérieur des exemplaires de cette variété par rapport à ceux des autres types et de la même période.

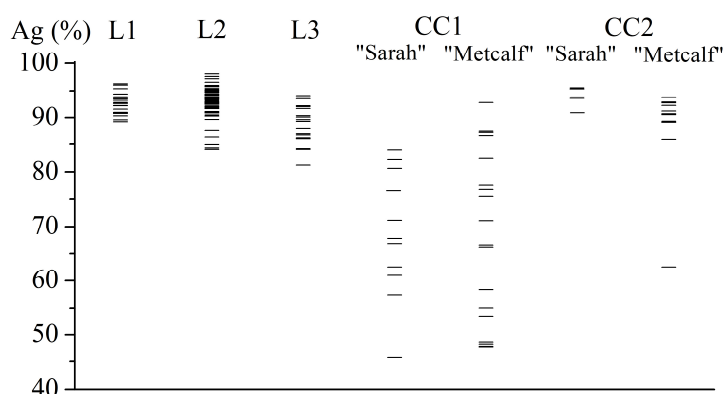


**Figure 131** - Représentation graphique du titre d'argent des deniers de la Première période d'émission de Charles le Chauve d'après nos analyses ("Sarah") et celles de (Metcalf et Northover, 1989) p. 114-115 ("Metcalf").

L'étude des différences de titre entre les différents types monétaires de la Première période d'émission de Charles le Chauve nécessite toutefois un *corpus* bien plus large que le nôtre afin de raisonner sur des données représentatives et non seulement indicatives. La corrélation de nouveaux résultats avec les événements politiques et militaires spécifiques à chaque zone du royaume de Francie Occidentale apporterait sans doute des éléments de réflexion supplémentaires pour une meilleure compréhension de la frappe monétaire durant les années 840-864.

Malgré le faible nombre d'analyses considérées, la chute du titre semble très marquée entre la fin du règne de Louis le Pieux entre 822/3 et 840, qui déjà avait vu une baisse sensible par rapport aux années 814-822/3.

Plus de vingt pourcents séparent les titres moyens des deniers du Type 3 de Louis le Pieux et ceux émis au nom de Charles le Chauve avant 864. La dispersion des teneurs en argent contribue de plus à suggérer un relâchement de la surveillance des ateliers monétaires : alors que l'écart-type relatif calculé sur les titres d'argent était de l'ordre de 2 % pour les trois types monétaires émis durant les années 793/4-822/3, celui-ci a augmenté légèrement pour le Type 3 de Louis le Pieux entre 822/3 et 840, passant à plus de 5 %, avant d'atteindre près de 18 % pour les premières émissions de Charles le Chauve. La Figure 132 illustre très clairement les deux évolutions observées concernant le titre des monnaies du roi de Francie Occidentale. Les analyses antérieures publiées pour des monnaies de même type, malgré la réserve qui accompagne des résultats obtenus par une méthode de surface, sont en bon accord avec les nôtres et semblent confirmer les deux tendances qui ressortent de nos analyses. L'interprétation de ces résultats est donc similaire à celle que nous proposons<sup>455</sup>.



**Figure 132** - Représentation graphique de l'évolution du titre d'argent des deniers des Types 1, 2 et 3 de Louis le Pieux et de ceux de Charles le Chauve antérieurs et postérieurs à 864<sup>456</sup>. Pour les deniers de Charles le Chauve nos résultats ("Sarah") sont comparés aux analyses antérieures de Metcalf et Northover<sup>457</sup> ("Metcalf").

Une corrélation peut être établie entre la chute du titre moyen des deniers, l'augmentation de la dispersion des valeurs individuelles, et le contexte politique et militaire des années 840-864. De manière très synthétique, cette période est

<sup>455</sup> (Metcalf et Northover, 1989) p. 115.

<sup>456</sup> L'ensemble des titres d'argent obtenus pour les deniers de Louis le Pieux a été représenté sur la Figure 132, quelle que soit l'origine géographique des pièces, à l'exception de celles de Venise. Pour les trois types monétaires de cet empereur, les teneurs en argent obtenues forment des groupes homogènes, que les pièces soient issues des ateliers de Louis le Pieux situés dans le territoire dont Charles le Chauve a hérité ou des autres. Il n'a pas donc pas été jugé utile de présenter les seuls deniers de Louis le Pieux émis au sein du futur royaume de Francie Occidentale.

<sup>457</sup> (Metcalf et Northover, 1989) p. 114-115 et p. 118-119 et (Metcalf et Northover, 1988) p. 101-104 et 110.

marquée par les conflits réguliers en Aquitaine avec Pépin II qui dispute à Charles le Chauve la souveraineté sur cette partie du territoire de Francie Occidentale, ainsi qu'avec les Bretons. Louis le Germanique se montre lui aussi hostile et envahit le royaume de son frère en 858. Enfin, les peuples venus du nord qui seront plus tard appelés Vikings mènent des attaques répétées dans une zone qui s'étend principalement de la Loire à l'Escaut. Leurs demandes de rançons ont sans doute influencé directement la politique monétaire de Charles le Chauve et pourraient avoir déséquilibré l'économie<sup>458</sup>.

L'étude conjointe de la localisation et du nombre des trésors du IX<sup>e</sup> siècle en Francie Occidentale avec celle des raids Vikings durant la même période alimente également la réflexion. Armstrong a mis en évidence quatre grandes périodes de ce point de vue<sup>459</sup>. Les deux premières correspondent aux années de règne de Louis le Pieux sur l'ensemble du territoire carolingien (814-840), et à celles de la première période de Charles le Chauve sur la Francie Occidentale du point de vue de la frappe monétaire (840-864). Armstrong constate que les dépôts de monnaies sont en très nette augmentation lors du passage de la première à la seconde période ; les trouvailles des années 840-864 se concentrent autour de Paris, le long de la Loire et en Aquitaine<sup>460</sup>. Ces résultats reflètent directement la progression des raids nordiques selon l'auteur.

La corrélation des événements historiques et des données numismatiques avec l'évolution de la composition des alliages monétaires justifie une campagne d'analyse ambitieuse et de grande ampleur de monnaies de Charles le Chauve de la période 840-864. Les typologie et chronologie propres à chaque atelier pourront ainsi être étudiées spécifiquement sur la base d'un nombre d'analyses représentatif ; la composition des deniers pourra de plus être examinée dans le but de mettre en évidence d'éventuelles corrélations avec les événements historiques spécifiques à chacune des différentes régions du territoire de Francie Occidentale.

De la même manière que pour les émissions de Lothaire en Francie Médiane, l'étude numismatique a suggéré à Coupland des tendances concernant la frappe monétaire durant la Première période du règne de Charles le Chauve sur la Francie Occidentale entre 840 et 864<sup>461</sup>. Le contraste avec le règne de Louis le Pieux du point de vue numismatique est en effet similaire pour les deux royaumes : la variété des types monétaires frappés durant les mêmes années sur des territoires théoriquement unifiés, et la poursuite de la circulation de types dont l'émission

---

<sup>458</sup> (Coupland, 1999).

<sup>459</sup> (Armstrong, 1998) p. 138.

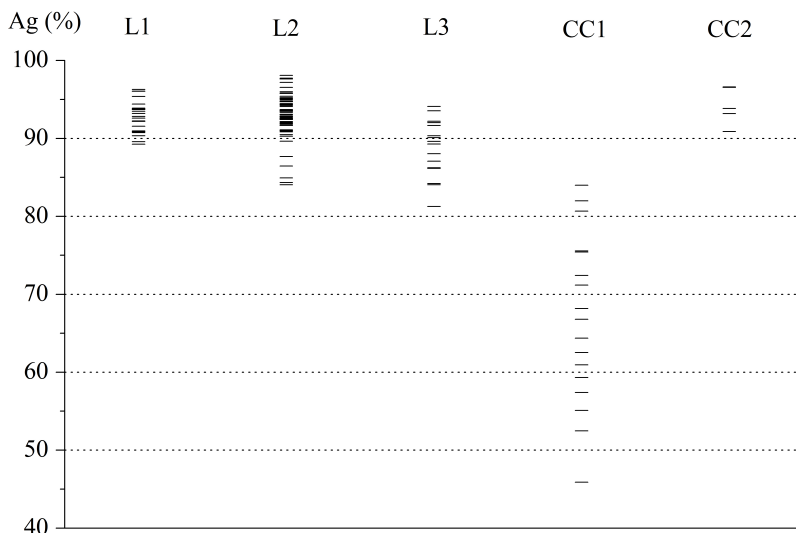
<sup>460</sup> (Armstrong, 1998) p. 138.

<sup>461</sup> (Coupland, 1991) p. 153.

s'est arrêtée, sont des premiers éléments qui suggèrent un relâchement de la surveillance des ateliers monétaires. La chute du titre par rapport aux émissions de Louis le Pieux, observée à partir des analyses de Metcalf, et confirmée par nos résultats, s'y ajoute. Coupland relie directement ces observations aux préoccupations militaires liées aux attaques Vikings en Francie Occidentale<sup>462</sup>.

***b. Charles le Chauve Deuxième période (864-877)***

L'interprétation des résultats obtenus pour les deniers au type de l'édit de Pîtres, ou Type GDR, comme celle proposée pour les émissions des périodes 822/3-840 et 840-864, a seulement vocation à estimer le titre d'argent moyen. Plus spécifiquement, des pistes de réflexion quant à l'efficacité de l'édit de Pîtres concernant la réaffirmation de l'autorité royale sur la frappe monétaire pourront être ébauchées à partir des titres d'argent déterminés.



**Figure 133** - Comparaison du titre d'argent des monnaies de Charles le Chauve de la Deuxième période (864-877) avec celui des exemplaires de la Première période de ce même souverain (840-864) et des trois Types de Louis le Pieux (de 814 à 840).

La moyenne des teneurs en argent des deniers analysés est de 94,2 %. Les valeurs de titre sont comprises entre 90 % et 97 %, et semblent relativement peu dispersées (écart-type relatif de 2,6 %). La représentation graphique des résultats obtenus pour les deniers de Charles le Chauve du Type GDR sont présentés sur la Figure 133.

<sup>462</sup> (Coupland, 1991) p. 153.

Nos résultats sont en bon accord avec ceux plus nombreux publiés par Metcalf et Northover pour des monnaies de même type<sup>463</sup>. Les teneurs en argent déterminées par ces chercheurs étaient en effet comprises entre 89 % et 94 %, à l'exception d'un échantillon à 62 % seulement qui peut être considéré comme un faux.

Les résultats de Metcalf, comme les nôtres, semblent montrer l'efficacité de la réforme monétaire consécutive à l'édit de Pîtres de 864 : pour la première fois depuis 822/3, le titre moyen redevient supérieur à 90 % (Figure 133). Le regroupement des valeurs est lui aussi remarquable par rapport à celles des exemplaires du Type 3 de Louis le Pieux et des frappes de Charles le Chauve des années 840-864 ; il rappelle davantage celui des deniers du Type 3 de Charlemagne et des Types 1 et 2 de Louis le Pieux.

Cette fois encore, la composition des trésors est cohérente avec l'évolution de la pureté des deniers carolingiens. Les trésors datés d'après 864 montrent en effet une excellente homogénéité de leur composition : les émissions antérieures à l'introduction du Type GDR en sont le plus souvent absentes<sup>464</sup>. Le renouvellement du numéraire en circulation en 864, qui n'avait plus eu lieu depuis 822/3, semble avoir été particulièrement efficace. Les trouvailles de monnaies de Charlemagne et de Louis le Pieux jusqu'en 822/3 montrent également un renouvellement rapide et efficace des pièces en circulation à chaque changement de type monétaire. Les monnaies analysées datées de ces années contiennent en moyenne 93 % d'argent environ. Au contraire, les pièces du Type 3 de Louis le Pieux, semblent avoir circulé bien après l'arrêt de leur frappe<sup>465</sup> ; l'analyse a montré que c'est durant cette période que le titre des alliages a commencé à fléchir. De même, les trésors de monnaies de Charles le Chauve antérieurs à l'édit de Pîtres montrent une grande variété de types et de périodes d'émission en leur sein. Cela coïncide avec la chute marquée et la grande dispersion du titre des monnaies frappées durant ces années. Pour toutes ces périodes donc, analyse élémentaire et étude numismatique dessinent des tendances parallèles.

Le rétablissement d'un type monétaire unique pour l'ensemble de la Francie Occidentale après la diversité numismatique des années 840-864, l'efficacité de la *renovatio* de 864, ainsi que le renforcement marqué du titre des monnaies, convergent pour dépeindre une période de reprise du contrôle de l'autorité carolingienne sur la frappe monétaire consécutivement à l'édit de Pîtres. Les données numismatiques et analytiques concordent avec la connaissance politique et

---

<sup>463</sup> (Metcalf et Northover, 1988).

<sup>464</sup> (Lafaurie, 1983) p. 139.

<sup>465</sup> Il s'agit bien de la poursuite de la circulation des monnaies du Type 3 et non de la poursuite de leur frappe après la mort de Louis le Pieux. Voir (Coupland, 1990) p. 35.

historique du règne de Charles le Chauve : les années postérieures à 864 sont en effet celles durant lesquelles le roi de Francie Occidentale est « *au faite de sa puissance* », et les incursions normandes en territoire carolingien en net recul<sup>466</sup>. L'analyse de Devroey est également en accord avec notre interprétation : les années 850/860 à 879 correspondent en effet selon lui à une phase de croissance consécutive à un déclin qui aurait commencé vers 830<sup>467</sup>. Devroey suggère de s'appuyer sur d'autres « *variables sociales [...] ou économiques* » afin d'approfondir cette idée de cycles successifs<sup>468</sup>. Il apparaît donc à la lumière des résultats de nos analyses qu'une véritable corrélation apparaît entre les cycles proposées par Devroey et l'évolution du titre des pièces d'argent de Charlemagne à Charles le Chauve.

### ***c. Les monnaies impériales de Charles le Chauve (876-877)***

Seules deux monnaies de Charles le Chauve à la titulature impériale ont été analysées dans le cadre de cette étude. Il s'agit d'oboles au nom de Bourges.

Ces deux pièces sont relativement pures en argent : leurs titres respectifs sont de 89,7 % pour Prou 745 et de 89,1 % pour Prou 746, et la moyenne de 84,4 %. Ces deux valeurs, si l'on considère qu'elles sont représentatives de l'ensemble de la production de monnaies impériales des années 876 et 877, sont légèrement inférieures à ce qui a été calculé pour les monnaies du Type GDR des années 864-877. La moyenne des cinq deniers analysés pour ce type est en effet de 94,2 %. Il conviendrait toutefois de confirmer cet écart par des analyses complémentaires de monnaies impériales de Charles le Chauve, en particulier de deniers plutôt que d'oboles, et d'étudier un nombre d'ateliers monétaires représentatif.

### ***d. Les monnaies de Charles le Chauve au monogramme carolin (840-877)***

Parmi les monnaies au monogramme carolin qui peuvent être attribuées à Charles le Chauve, certaines sont antérieures à l'édit de Pîtres et datent de la Première période d'émission de ce souverain (840-864), et les autres ont été frappées durant la Deuxième période de son règne du point de vue monétaire (864-877). Nous avons vu que les deux groupes de monnaies attribuées aux deux principales périodes d'émissions monétaires de Charles le Chauve présentent des caractéristiques différentes du point de vue de leur titre : celles frappées avant 864 contiennent en moyenne 68,6 % d'argent, et les valeurs sont très dispersées ; celles

---

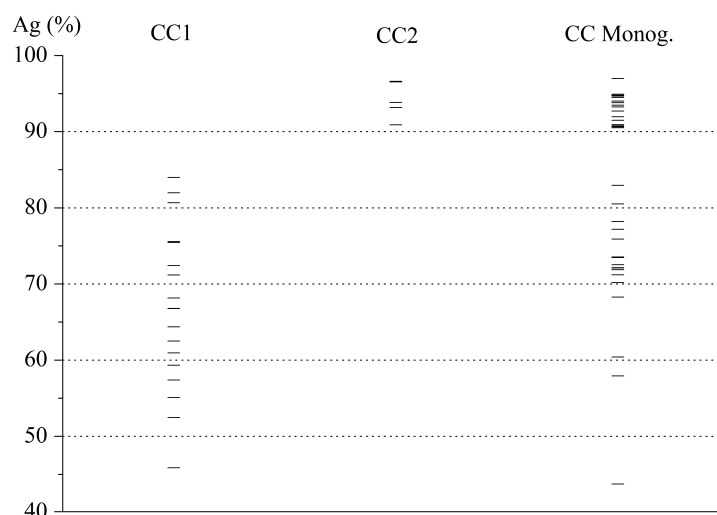
<sup>466</sup> (Bruand, 2002) p. 170.

<sup>467</sup> (Devroey 2006), p. 351.

<sup>468</sup> (Devroey 2006), p. 351. Voir également (Verhulst, 2002), p. 547.



qui sont postérieures à l'édit de Pîtres présentent un titre moyen bien plus élevé de 94,2 %, et les valeurs semblent plus resserrées. La comparaison du titre des monnaies de Charles le Chauve de la Première et de la Deuxième période d'émission avec celui des exemplaires au monogramme carolin attribués à ce souverain peut permettre de rapprocher ces pièces des années 840-864 ou 864-877. Les résultats obtenus pour chacun des trois groupes considérés apparaissent sur la Figure 134.

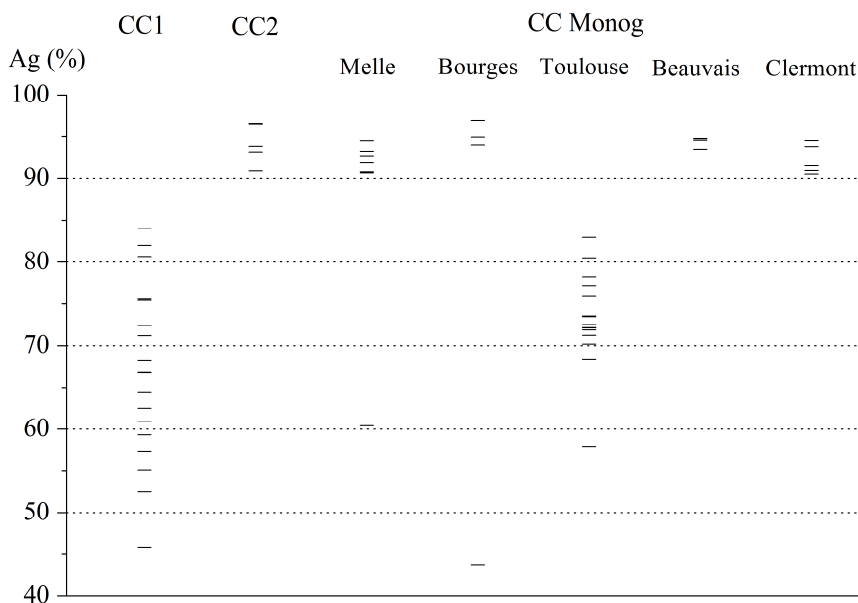


**Figure 134** - Comparaison du titre d'argent des monnaies de Charles le Chauve de la Première période (840-864), de la Deuxième période (864-877) et des pièces au monogramme carolin attribuées à ce souverain.

La représentation graphique du titre d'argent des monnaies au monogramme carolin attribuées à l'ensemble du règne de Charles le Chauve sur la Figure 134 met en évidence des alliages de puretés diverses : quelques pièces présentent des titres très faibles de l'ordre de 40 % à 60 % d'argent ; une proportion importante contient de 70 % d'argent environ à 85 % ; les valeurs déterminées pour les autres exemplaires sont supérieures à 90 %. La comparaison avec les titres obtenus pour les monnaies de Charles le Chauve attribuées aux périodes 840-864 et 864-877 suggère que les exemplaires de titre supérieur à 90 % sont à rapprocher de la période la plus tardive, tandis que les autres seraient attribuables aux premières années du règne de Charles le Chauve.

La différenciation des pièces issues de chaque atelier permet d'aller plus avant dans la problématique de la datation des monnaies au monogramme carolin attribuées à l'ensemble du règne de Charles le Chauve (Figure 135). La comparaison avec les exemplaires de la Première et de la Deuxième période

d'émission de ce souverain, et la prise en compte des données qui ressortent de l'étude des trésors, est également riche d'enseignements.



**Figure 135** - Etude du titre d'argent des monnaies au monogramme carolin attribuées à Charles le Chauve et comparaison avec les exemplaires des deux principales périodes d'émission de ce souverain.

Contrairement aux ateliers de Melle, Bourges et Toulouse, ceux de Beauvais et de Clermont n'ont pas frappé de monnaies au monogramme carolin sous Charlemagne. Seuls des trésors datés du règne de Charles le Chauve renferment de tels exemplaires. Les titres déterminés pour les pièces au monogramme carolin analysées de ces deux ateliers sont très bons : ils sont compris entre 90 % et 95 %. Ces valeurs rapprochent indiscutablement ces monnaies de la Deuxième période d'émission de Charles le Chauve (Figure 135). L'étude des trésors est cohérente avec cette hypothèse : ce sont en effet des trésors constitués majoritairement de pièces du Type GDR, voire plus tardifs, qui contiennent des monnaies au monogramme carolin des deux ateliers considérés (Glisy, Arras et Cuerdale pour Beauvais ; Arras, Avignon, Bourgneuf, Cuerdale, Gannat et Moulin-Gargot pour Clermont)<sup>469</sup>. Pour ces deux ateliers, la connaissance de la pureté en argent des alliages monétaires est cohérente avec l'étude des trésors.

Considérons maintenant les trois ateliers de Melle, Bourges et Toulouse. Pour Melle comme pour Bourges, les monnaies au monogramme carolin attribuées

<sup>469</sup> Voir Haertle pour le détail de l'ensemble de ces trésors.

à Charles le Chauve forment un groupe homogène de titre moyen supérieur à 90 %, à l'exception d'un exemplaire : il s'agit pour Melle de BnF 1996-115, qui ne contient que 60,4 % d'argent, et de Prou 741 pour Bourges, dont le titre est de 43,7 % d'argent seulement.

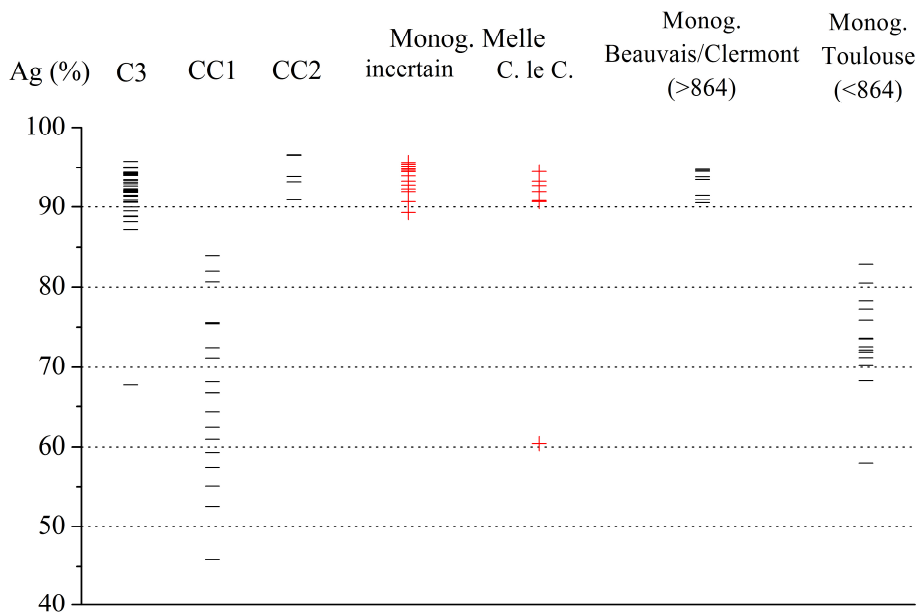
Deux hypothèses peuvent être proposées : soit l'ensemble des monnaies analysées au monogramme carolin attribuées à Charles le Chauve de Melle et de Bourges, à l'exception de Prou 741 et de BnF1996-115, a été frappé après 864, et les deux pièces qui s'en écartent entre 840 et 864 ; soit toutes ces monnaies datent de l'ensemble du règne de Charles le Chauve. Cela supposerait que les pièces au monogramme carolin auraient été les seules, parmi tous les types frappés entre 840 et 864, dont le titre moyen aurait été très élevé, et leur dispersion très faible. Dans ce cas, Prou 741 et de BnF1996-115 pourraient être des fausses monnaies frappées avant ou après 864. L'hypothèse d'une majorité d'exemplaires postérieurs à 864 dans la collection nationale française nous semble plus probable que le maintien d'un standard de titre élevé pour les seules pièces au monogramme carolin entre 840 et 864. L'analyse de monnaies issues de trésors datés précisément permettrait une meilleure compréhension de cette problématique. Si l'hypothèse d'une augmentation du titre des monnaies au monogramme carolin suite à l'édit de Pîtres est avérée par des analyses complémentaires, cela signifierait que la caractérisation du titre d'argent peut permettre de dater la période d'émission de monnaies identiques du point de vue numismatique. La répartition chronologique des exemplaires contenus dans les trésors datés du règne de Charles le Chauve pourrait ainsi être mieux connue.

Les monnaies de Toulouse, à l'instar de celles de Melle et de Bourges, ne peuvent être attribuées individuellement à la Première ou à la Deuxième période d'émission de Charles le Chauve sur la seule base de critères numismatiques. Pour l'ensemble des exemplaires analysés, la teneur en argent des monnaies de Toulouse au monogramme carolin attribuées à Charles le Chauve est plus proche de ce qui a été observé pour la Première période d'émission de ce souverain que pour la Deuxième (Figure 135). Les valeurs sont comprises entre 65 % et 85 % d'argent, à l'exception d'un exemplaire dont la pureté est inférieure à 60 %. La moyenne pour l'ensemble de ces pièces est de 73,4 %, ce qui peut être considéré comme comparable avec le titre moyen des pièces de Charles le Chauve attribuées à la période 840-864 (68,6 %). Aucune des monnaies toulousaines analysées ne présente de titre supérieur à 85 %, alors que les valeurs sont toutes supérieures à 90 % pour celles du Type GDR postérieures à 864. Ces données suggèrent donc que les monnaies de Toulouse au monogramme carolin de notre *corpus* datent

toutes des années 840-864. La présence d'un grand nombre d'acquisitions récentes de ce type au sein de la collection de la BnF renforce cette hypothèse : dix des quinze monnaies de Toulouse de Charles le Chauve au monogramme carolin analysées ne figurent pas dans le catalogue de Prou. Le registre d'acquisition suggère que ces nouvelles acquisitions proviendraient du trésor d'Auzeville. La présence dans le médaillier carolingien d'un grand nombre de nouvelles acquisitions de monnaies toulousaines de Pépin II d'Aquitaine, dont la restauration a donné un aspect identique à celui des pièces au monogramme dont il est question ici, renforce l'hypothèse d'une frappe antérieure à 864 : ce trésor, constitué en grande majorité de monnaies au monogramme carolin de Charles le Chauve, et au monogramme pippinide de Pépin II d'Aquitaine, est en effet daté avec certitude d'avant 864, et probablement d'avant 850.

### 9. Les monnaies au monogramme carolin de période d'attribution incertaine

Les monnaies au monogramme carolin pour lesquelles l'attribution à Charlemagne ou Charles le Chauve n'est pas possible, en l'état actuel des connaissances numismatiques, sont certaines de celles issues de l'atelier de Melle.



**Figure 136** - Comparaison du titre des deniers au monogramme carolin de période d'attribution incertaine avec celui des exemplaires du Type 3 de Charlemagne, des émissions de Charles le Chauve antérieures et postérieures à 864.

L'étude des résultats individuels, ainsi que la représentation graphique des titres obtenus (Figure 136), mettent en évidence un groupe très homogène et de

titre très élevé pour les monnaies issues des deux ateliers considérés, deniers comme oboles. Le titre moyen est de 93,9 % d'argent. Les valeurs sont comprises entre 89,3 % et 95,7 %, et l'écart-type relatif est de 1,8 %.

Les valeurs caractéristiques du titre des monnaies au monogramme carolin de période d'attribution indéterminée sont très similaires à celles obtenues pour les pièces du Type 3 de Charlemagne. Les moyennes respectives sont de 93,9 % pour les exemplaires indéterminés de Melle, et de 92,3 % pour celles des autres ateliers datées des années 793/4-812.

La même similarité peut être observée du point de vue du titre d'argent entre les monnaies melloises dont l'attribution à Charlemagne ou Charles le Chauve est problématique, et celles de la Deuxième période d'émission de ce dernier souverain (864-877) : la moyenne de teneur en argent est en effet de 94,2 % pour les pièces du Type GDR analysées.

En revanche, la pureté de tous les exemplaires au monogramme carolin de souverain incertain est largement supérieur à celle des émissions de la Première période de Charles le Chauve : les moyennes respectives de ces deux groupes sont de 93,9 % et de 68,6 %. La dispersion des valeurs est en outre sans commune mesure (écarts-types relatifs de 1,8 % et de 17,2 %).

Plusieurs hypothèses peuvent être émises pour expliquer les similarités et différences observées avec certains des types monétaires de Charlemagne et Charles le Chauve. L'atelier de Melle, en lien avec une exploitation d'argent d'importance, serait-il parvenu à maintenir un titre élevé pour ses émissions durant les années 840-864, tandis que la pureté des pièces issues des officines situées dans d'autres régions de Francie Occidentale aurait nettement fléchi ? Ou bien les monnaies analysées auraient-elles toutes été frappées durant les années 793/4-812, et après 864 ?

L'étude du titre de ces monnaies n'est pas suffisante pour clarifier cette problématique. L'analyse de pièces issues de trésors dont l'attribution à l'une des deux périodes d'émission de Charles le Chauve serait très bénéfique pour comprendre l'évolution du titre des exemplaires au monogramme carolin issus d'ateliers aquitains. Peut-être alors l'analyse élémentaire permettra-t-elle de caractériser le titre des monnaies au monogramme frappées entre 793/4 et 812, entre 840 et 864 et après 864. Seule une campagne d'analyse spécifique et d'envergure de monnaies des différents types et des deux principales périodes d'émission de Charles le Chauve permettrait d'éclairer cette problématique.

### III. Les éléments mineurs et traces

Les éléments considérés comme « mineurs et traces » sont tous les constituants des monnaies à l'exception de l'argent et du cuivre<sup>470</sup>.

#### 1. L'évolution des teneurs globales en éléments mineurs et traces

La somme des teneurs en éléments mineurs et traces représente, dans la plupart des cas, la quantité d'impuretés contenue dans les métaux mélangés pour obtenir l'alliage désiré. Bien qu'elle soit souvent corrélée, cette valeur n'a théoriquement pas de lien direct avec la quantité de cuivre ajouté à l'argent<sup>471</sup>. Du cuivre pur peut en effet avoir été ajouté en grande quantité à de l'argent pur ; l'alliage obtenu ainsi sera d'un titre faible, mais contiendra très peu d'impuretés. La méconnaissance des procédures de fabrication et de purification des alliages monétaires au sein des ateliers carolingiens est une source de difficulté pour l'interprétation des teneurs de certains éléments mineurs principaux.

Les éléments considérés comme « impuretés » les plus abondants dans les monnaies d'argent sont ceux désignés sous l'appellation « éléments mineurs principaux » dans la première partie de cette thèse, dédiée à la mise au point du protocole d'analyse des monnaies d'argent par LA-ICP-MS : il s'agit du plomb, de l'or, de l'étain, du zinc et du bismuth. Le plomb est l'élément dont la teneur est dans la plupart des cas la plus élevée, après celles de l'argent et du cuivre. L'or et le zinc sont le plus souvent les deux éléments les plus concentrés après le plomb. Les teneurs en étain peuvent exceptionnellement être importantes, mais demeurent faibles le plus souvent. Des concentrations élevées en bismuth de l'ordre du pourcent, voire supérieures, peuvent apparaître dans certains monnayages d'argent.

Le cas du zinc est particulier : ce métal n'est en effet pas connu en tant que tel par les métallurgistes anciens jusqu'à l'époque moderne<sup>472</sup>. Des teneurs élevées de cet élément dans des alliages monétaires à base d'argent traduisent donc inévitablement l'ajout de laiton, dont le procédé de fabrication par cémentation est connu depuis l'Antiquité<sup>473</sup>. Bompaire et Guerra rapportent que des teneurs en zinc supérieures à 0,1 % (1000 ppm) sont caractéristiques d'un ajout de laiton<sup>474</sup>.

---

<sup>470</sup> L'argent et le cuivre sont considérés comme les deux constituants majeurs des alliages monétaires bien que, dans certains cas, le cuivre ne soit pas l'élément le plus abondant après l'argent.

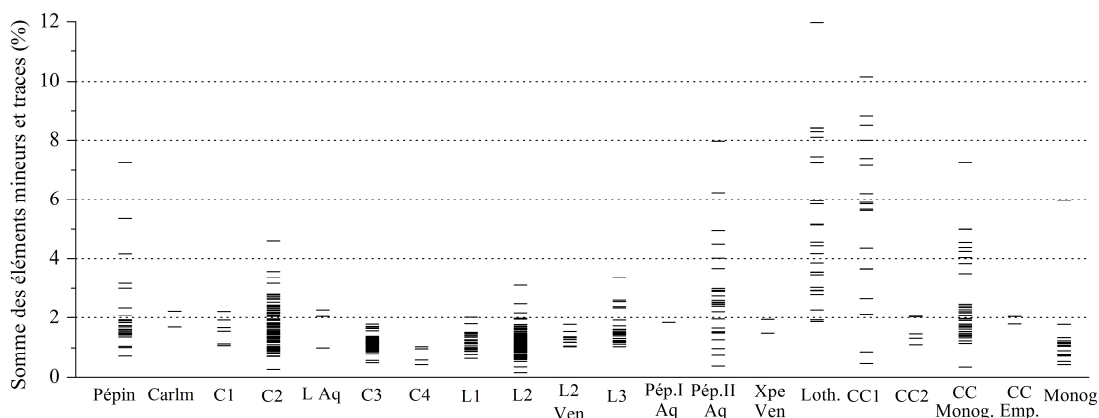
<sup>471</sup> Une hypothétique capacité technique limitée des monnayeurs du haut Moyen Age pour la purification de l'argent ne peut pas expliquer la présence systématique de plusieurs pourcents de cuivre dans les monnaies carolingiennes.

<sup>472</sup> Voir sur l'évolution des techniques de fabrication du laiton (Doridot *et al.*, 2006) p. 15-16.

<sup>473</sup> (Doridot *et al.*, 2006) p. 15.

<sup>474</sup> (Bompaire et Guerra, 1997) p. 877.

L'évolution de la somme des teneurs en éléments mineurs et traces est dans un premier temps étudié ici. La représentation graphique de cette évolution apparaît sur la Figure 137.



**Figure 137** - Evolution de la somme des teneurs en éléments mineurs et traces dans les monnaies carolingiennes par type monétaire ou période d'émission.

Les monnaies de Pépin le Bref, comme celles de Carloman, deux premiers types monétaires de Charlemagne et de Louis roi d'Aquitaine, contiennent en moyenne entre 1 % et 2 % d'impuretés<sup>475</sup>. Aucune tendance d'évolution marquée ne semble se dessiner d'après l'étude des teneurs globales en éléments mineurs et traces entre 751 et 793/4, depuis Pépin le Bref jusqu'à la réforme de Charlemagne.

De la même manière que la réforme de 793/4 semble avoir contribué à épurer le numéraire en circulation des monnaies de faible titre qui existaient pour le Type 2 de Charlemagne, il semble que le renouvellement lié à cette évolution ait également été l'occasion de l'élimination des alliages contenant trop d'impuretés. La moyenne de la somme des teneurs en éléments mineurs et traces passe ainsi de 1,8 % à 1,2 % de part et d'autre de la réforme de 793/4. Près du tiers des monnaies du Type 2 de Charlemagne contient plus de 2 % d'éléments mineurs et traces ; la pièce du Type 3 de ce souverain pour laquelle cette valeur est la plus élevée n'en contient que 1,8 %. L'amélioration de la pureté des alliages constituant les monnaies après la réforme de 793/4 confirme donc le renforcement du contrôle du pouvoir carolingien sur la fabrication monétaire.

<sup>475</sup> Les points correspondant à des monnaies de Pépin le Bref qui se détachent des autres sur la Figure 137 concernent les exemplaires dont les teneurs en or sont particulièrement élevées, de l'ordre du pourcent et jusqu'à plusieurs pourcents. Sur ces résultats voir *infra* p. 360.

Les trois deniers du Type 2 de Charlemagne attribués à Mayence Prou 935, Prou 936 et Prou 937 ne présentent pas des teneurs en zinc particulièrement élevées comme c'était le cas pour l'exemplaire similaire analysé par Metcalf<sup>476</sup>.

Bien que le nombre d'analyses de monnaies du Type 4 de Charlemagne soit très restreint, l'examen des teneurs en éléments mineurs et traces semble confirmer les observations faites à partir de l'étude de leur titre : l'excellent titre de ces pièces s'accompagne d'une très grande pureté des alliages argent-cuivre. La moyenne de 0,7 % pour la somme des teneurs en éléments mineurs et traces dans ces deniers montre de plus que les valeurs antérieures de l'ordre de 1 % à 2 % ne sont pas liées à des limitations techniques ou de savoir-faire. C'est la qualité de la purification des métaux alliés et le soin qui leur est apporté qui justifient sans doute les différences observées.

Les deniers impériaux au buste de Charlemagne, vecteurs de prestige auprès de la population, semblent donc marquer l'apogée du monnayage carolingien tant du point de vue du titre d'argent que de celui des teneurs en impuretés.

Les pièces du Type 1 de Louis le Pieux poursuivent le standard de pureté initié lors de l'introduction des monnaies au monogramme et la réforme de 793/4 de Charlemagne : aucune d'entre elles ne contient plus de 2 % d'éléments mineurs et traces. La moyenne pour l'ensemble des exemplaires analysés de la période 814-818 est de 1,3 %.

De la même manière que quelques échantillons avaient révélé des titres sensiblement plus faibles que les autres, certaines monnaies du Type 2 de Louis le Pieux se distinguent des autres de par des teneurs globales élevées en éléments mineurs et traces. Il ne s'agit pas des pièces évoquées dans le paragraphe spécifique au titre des deniers de ce type mais, pour deux des trois monnaies concernées, d'oboles, dont les cas seront traités plus loin<sup>477</sup>. En moyenne, la somme des teneurs reste relativement faible, à 1,2 %.

Les deniers du Type 3 de Louis le Pieux analysés ont révélé une baisse sensible du titre d'argent par rapport aux types mis en circulation sous Charlemagne à partir de la réforme de 793/4, puis sous Louis le Pieux jusqu'en 822/3. La somme des éléments mineurs et traces contenus dans les monnaies au temple de Louis progresse de manière inversement proportionnelle à l'évolution du titre d'argent ; c'est ainsi la valeur de 1,7 % qui est atteinte, c'est-à-dire la même

---

<sup>476</sup> (Metcalf et Northover, 1989) n° 18 p. 106.

<sup>477</sup> Voir *infra* p. 364.



que pour les monnaies de Charlemagne antérieures à la réforme. Les valeurs inférieures à 1% disparaissent pour le Type 3 de Louis le Pieux alors qu'elles constituaient une fraction importante de l'ensemble pour les types frappés par Charlemagne et Louis le Pieux entre 793/4 et 822/3.

Pour les monnaies de Charlemagne comme pour celles de Louis le Pieux, les teneurs en impuretés semblent corrélées à celles du cuivre, et donc inversement proportionnelles à l'argent. C'est donc la qualité de la purification du métal rouge qui influence cette caractéristique de l'alliage monétaire.

Les monnaies de Lothaire (840-855) et celles de la Première période d'émission de Charles le Chauve (840-864) peuvent ici être traitées conjointement : leurs caractéristiques générales en éléments mineurs et traces, à l'instar de ce qui avait été observé pour le titre d'argent, sont en effet similaires (Figure 137). Pour toutes ces monnaies, on observe une hausse très nette de la somme des teneurs en éléments mineurs et traces, essentiellement due à la présence de zinc. Les pièces de Charles le Chauve antérieures à l'édit de Pîtres contiennent en moyenne 5,4 % d'impuretés, et celles de Lothaire 5,1 %. Ces valeurs sont les plus élevées pour l'ensemble de la période considérée. La baisse du titre d'argent des monnaies est donc corrélée avec la présence de quantités importantes d'impuretés au sein des alliages monétaires.

Après 864 en Francie Occidentale, les quelques résultats dont nous disposons pour les deniers du Type GDR, bien qu'insuffisants, suggèrent un retour à des valeurs plus raisonnables pour la somme des teneurs en éléments mineurs et traces. Les exemplaires analysés contiennent en moyenne 1,6 % de ces éléments, ce qui signifie que la hausse du titre consécutive à la *renovatio* de 864 s'est accompagnée d'un assainissement des métaux monnayés. La moyenne est toutefois plus proche de celle déterminée pour les pièces de Charlemagne antérieures à la réforme de 793/4 (1,8 %) que celles calculées pour les exemplaires de ce souverain postérieures à cette date (1,2 %), et ceux de Louis le Pieux des deux types antérieurs à 822/3 (1,3 % et 1,3 %). Il semble donc que la purification des alliages monétaires lors de la refonte du numéraire en circulation en 864 n'ait pas conduit à une purification des alliages qui corresponde à celle observée pour les années 793/4-822/3.

Les deux monnaies impériales de Charles le Chauve présentent une quantité globale d'impuretés globale similaire à ce qui est observé pour les pièces du Type GDR, de l'ordre de 2 %.

L'examen des teneurs globales en éléments mineurs et traces est instructive pour la compréhension des problématiques liées aux monnaies au monogramme carolin de période d'émission incertaine ou attribuées à Charles le Chauve. Les moyennes calculées, ainsi que l'examen de la Figure 137, tendent à rapprocher les pièces de souverain incertain au Type 3 de Charlemagne : les moyennes sont respectivement de 1,0 % et de 1,3 %. Les pièces au monogramme carolin attribuables à Charles le Chauve tendent à se rapprocher de celles de la Deuxième période d'émission de ce souverain, à l'exception de Prou 741 qui contient plus de 7 % d'impuretés, soit une valeur conforme à ce qui est observé pour les pièces frappées sous Charles le Chauve avant 864 : dans les deux cas, la somme des teneurs en éléments mineurs et traces est de 1,7 %. Cela suggère que la majorité des pièces analysées au monogramme carolin de période d'émission incertaine auraient été frappées sous Charlemagne entre 793/4 et 812, et que celles attribuées à Charles le Chauve l'auraient été après 864, à l'exception de Prou 741. BnF 1996-115, dont le titre faible de 60,4 % avait suggéré une frappe entre 840 et 864, contient 2 % d'impuretés, soit une valeur qui peut la rapprocher des deux périodes d'émission de Charles le Chauve.

La somme des teneurs en éléments mineurs et traces n'est toutefois pas un critère qui permette d'attribuer individuellement chaque exemplaire à un souverain ou à une période d'émission.

## **2. Des particularités propres à certains types monétaires**

Pour certains types monétaires, des particularités propres à la période ou des teneurs remarquables d'éléments mineurs pour certains échantillons sont détaillées dans des paragraphes spécifiques. Les types absents des paragraphes de cette section ne présentent pas de spécificité suffisante pour être mentionnée.

### ***a. Pépin le Bref (751-768)***

Certaines des monnaies de Pépin le Bref présentent des teneurs en or particulièrement élevées. Cinq d'entre elles, soit 23 % du total, contiennent plus de deux pourcents de cet élément. Il s'agit des cinq échantillons les plus riches en or parmi l'ensemble du *corpus* d'analyse. La majorité des pièces au nom de Pépin le Bref se classent parmi celles pour lesquelles les concentrations en or se sont révélées les plus élevées en comparaison avec la totalité des exemplaires analysés.

Le denier pour lequel la teneur en or est la plus haute (6,7 %) est issu de l'atelier de Paris (Prou 315). Les quatre autres monnaies qui contiennent plus de 2 % de cet élément sont pour l'une de Quentovic (Prou 184) et pour les autres d'ateliers indéterminés. Il est donc difficile dans ces conditions d'essayer de corrélérer la teneur en or de monnaies de Pépin le Bref avec leur origine géographique.

Bien que les monnayeurs qui ont frappé ces monnaies aient pu ne pas avoir conscience de cette particularité, les teneurs en or élevées révélées par les analyses de deniers de Pépin le Bref ne peuvent être dues à la présence d'impuretés dans de l'argent directement extrait d'une mine. Cela signifie que de l'or pur a été ajouté à de l'argent. Ou plus vraisemblablement s'est-il agi de l'opération inverse : on peut imaginer que des stocks d'or très affaibli par des quantités importantes d'argent de la période mérovingienne aient été utilisés pour la frappe de deniers d'argent mérovingiens. Leur couleur très pâle pourrait être passée inaperçue, si bien que cet or altéré, constitué majoritairement d'argent, aurait été pris pour du métal blanc pur. Les teneurs élevées en or pourraient s'être maintenues dans le monnayage d'argent mérovingien jusqu'à la période carolingienne. L'or et l'argent ne peuvent être séparés selon les procédés métallurgiques anciens ; l'or contenu dans les deniers de Pépin le Bref pourrait donc avoir été progressivement dilué lors des refontes et des purifications destinées à éliminer les métaux vils.

#### ***b. Charlemagne Première période : Types 1 et 2 (768-771 et 771-793/4)***

Les monnaies de notre *corpus* du Type 1 de Charlemagne sont trop peu nombreuses pour permettre d'étudier la poursuite de la tendance observée pour l'or concernant les deniers de Pépin le Bref. Les analyses des exemplaires du Type 2 de Charlemagne, bien plus représentatives, mettent en évidence pour certaines d'entre elles des teneurs en or élevées qui les placent dans la continuité des pièces du précédent souverain.

Huit des monnaies de Charlemagne frappées entre 771 et 793/4 contiennent plus de un pourcent de ce constituant. Il s'agit, après les cinq pièces de Pépin le Bref mentionnées dans le paragraphe précédent, des valeurs les plus élevées en or de l'ensemble du *corpus* considéré. D'une manière générale – à l'exception des pièces au nom de Melle –, les monnaies du Type 2 de Charlemagne présentent des teneurs en or relativement élevées par rapport aux frappes ultérieures. L'hypothèse d'une dilution progressive de l'or contenu dans les monnaies d'argent de Pépin le Bref reste donc valide.

Aucune particularité n'a été décelée du point de vue d'un ou plusieurs éléments mineurs ou traces pour les monnaies de Charlemagne des Types 3 et 4 frappés après la réforme de 793/4, ni pour l'ensemble des échantillons au nom de Louis le Pieux. Les teneurs en or relativement élevées semblent caractériser les émissions antérieures de Charlemagne et celles de Pépin le Bref. Les refontes depuis l'époque de Pépin le Bref, ainsi que la probable augmentation du volume monétaire en circulation, ont sans doute contribué à diluer l'or résiduel dans l'ensemble du stock d'argent carolingien.

### ***c. Pépin II d'Aquitaine (839-852)***

Certaines des monnaies de Pépin II d'Aquitaine présentent des teneurs en zinc élevées qui, rapportées au cuivre, suggèrent l'alliage de laiton à l'argent. Près de la moitié des pièces de Pépin II d'Aquitaine analysées contiennent plus de un pourcent de zinc. La teneur la plus élevée déterminée au sein de notre *corpus* pour ce monnayage atteint près de 7 %.

Le zinc en tant que métal n'était pas connu pendant le Moyen Age. Il n'est donc pas possible que du zinc pur ait été ajouté seul à l'argent qui constitue les monnaies. Des teneurs de plusieurs pourcents de cet élément suggèrent donc le mélange de laiton et non de cuivre pur à l'argent destiné à la fabrication monétaire<sup>478</sup>. Le calcul des rapports entre les teneurs en zinc et la somme des teneurs en zinc et en cuivre permet d'estimer la proportion de zinc dans les laitons ajoutés pour la fabrication de chaque échantillon.

Aucune corrélation ne peut être établie entre le type monétaire, le lieu d'émission et la présence de zinc en quantité importante.

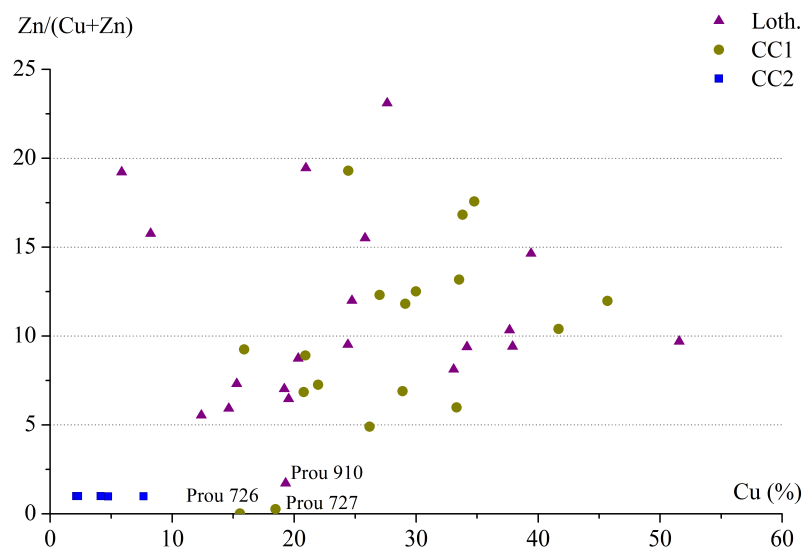
### ***d. Lothaire (840-855) et Charles le Chauve Première période (840-864)***

Les monnaies de Lothaire frappées entre 840 et 855, comme celles de Charles le Chauve de la Première période (840-864), présentent la même particularité du point de vue d'un des éléments mineurs principaux : ces pièces contiennent des quantités importantes de zinc. Pour l'essentiel des exemplaires analysés, les concentrations sont comprises entre 1 % et 8 %.

Les teneurs en zinc sont représentées en fonction des rapports entre les teneurs en zinc et les sommes des teneurs en zinc et en cuivre sur la Figure 138.

---

<sup>478</sup> Voir *supra* p. 356.



**Figure 138** - Représentation graphique des teneurs en cuivre en fonction des rapports de teneurs entre le zinc et la somme zinc+cuivre pour les monnaies de Lothaire et celles de Charles le Chauve.

A l'exception des deux deniers de Charles le Chauve de Melle à la légende en deux lignes au revers Prou 726 et Prou 727, et de celui de Lothaire de Pavie Prou 910, tous les échantillons ont été fabriqués à partir de laitons contenant au moins cinq pourcents de zinc (Figure 138). La dispersion importante des teneurs en zinc dans les laitons, corrélée à celle des teneurs en cuivre, semble montrer que des alliages cuivreux très divers, sans doute mélangés et peut-être plusieurs fois refondus, ont été alliés pour la fabrication monétaire sous Lothaire et sous Charles le Chauve entre 840 et 864.

La présence de plusieurs pourcents de zinc dans les monnaies de Charles le Chauve antérieures à 864 et dans celles de Lothaire est confirmée par les résultats des analyses de pièces de ce type publiées par Metcalf et Northover<sup>479</sup>. Il s'agit donc, en Francie Occidentale comme en Francie Médiante, d'une tendance générale des monnayeurs à utiliser du laiton et non du cuivre pour affaiblir l'argent destiné à la fabrication monétaire.

Après l'édit de Pîtres, comme pour le titre d'argent, les teneurs en zinc retrouvent un niveau qui correspond davantage à ce qui avait été observé avant 840 pour les trois premiers souverains carolingiens (Figure 138). Il semble donc que l'alliage de laiton à l'argent dans la fabrication monétaire sous les premiers Carolingiens soit une caractéristique des années 840-864 en Francie Occidentale, et au moins des années 840-855 en Francie Médiante. Cette tendance semble, en outre, aller de pair avec un relâchement du contrôle des ateliers de frappe.

<sup>479</sup> (Metcalf et Northover, 1989) p. 114-115.

## IV. Des problématiques spécifiques

### 1. Les oboles

Pour l'ensemble de la période considérée, les oboles constituent une fraction relativement faible de notre *corpus* et, semble-t-il d'après l'étude des trésors, du numéraire en circulation lorsque ces monnaies avaient cours<sup>480</sup>. Peu de demi-deniers de chaque type ont en conséquence pu être analysés, aussi les résultats sont dans la plupart des cas plus indicatifs que représentatifs. La présence d'une grande quantité d'exemplaires au nom de Melle parmi ces espèces nous incite de plus à la prudence : nous le verrons par la suite, les deniers issus de cet atelier présentent des titres qui les différencient des autres pour certains des types monétaires étudiés. Malgré ces réserves, la composition des oboles doit être étudiée spécifiquement et comparée à celle des deniers frappés durant les mêmes années.

L'évolution du titre d'argent des oboles est étudiée pour les types concernés en comparaison avec celle observée pour les deniers dans un premier temps ; les teneurs en éléments mineurs et traces sont examinées dans un deuxième temps.

#### *a. Le titre d'argent des oboles : comparaison avec les deniers*

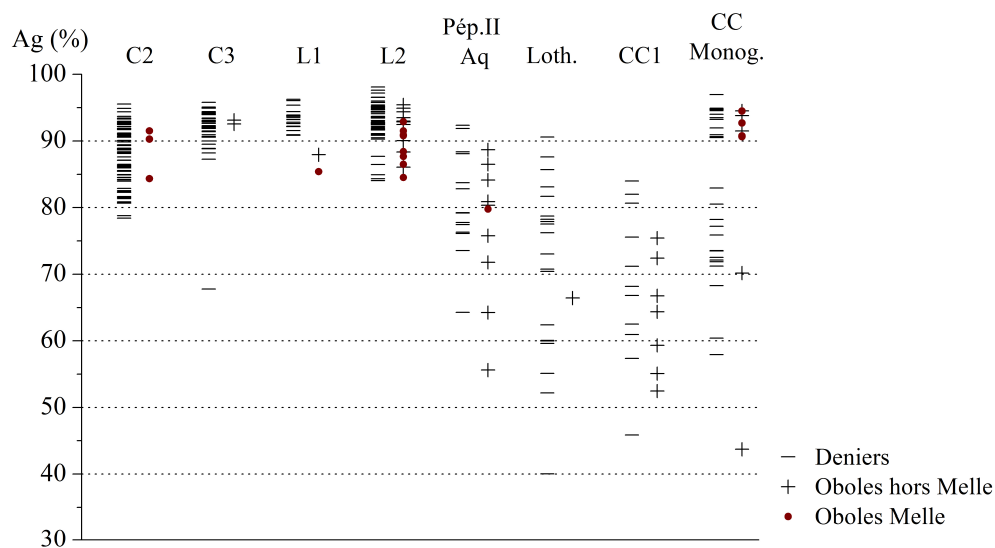
Les types monétaires ou périodes d'émission pour lesquels des oboles ont été analysées sont les suivants : Charlemagne Type 2 ; Charlemagne Type 3 ; Louis le Pieux Type 1 ; Louis le Pieux Type 2 ; Pépin II d'Aquitaine ; Lothaire ; Charles le Chauve Première période ; Monnaies au monogramme carolin de Charles le Chauve. La comparaison avec le titre des deniers n'a donc de sens que pour les monnaies concernées.

La comparaison entre le titre des deniers et oboles par type monétaire ou période d'émission apparaît sur la Figure 139.

Les monnaies au monogramme carolin de période d'attribution incertaine ne sont pas présentées ici : il s'agit de monnaies de Melle dont l'interprétation a été dissociée pour des raisons typologiques et numismatiques. Les oboles de Melle ont été reportées sur la Figure 139 : celles-ci sont en effet les seules, ou représentent une proportion importante de la totalité des demi-deniers, pour de nombreux types monétaires. Des spécificités des oboles de Melle nous incitent toutefois à les dissocier et à baser notre interprétation, autant que faire se peut, sur le titre de celles issues d'autres ateliers de frappe.

---

<sup>480</sup> Il est vrai toutefois que la valeur intrinsèque plus faible de l'obole par rapport au denier peut avoir limité leur thésaurisation. Cela pourrait signifier que la proportion d'oboles contenues dans les trésors ne reflète pas la réalité de la circulation monétaire carolingienne.



**Figure 139** - Comparaison des titres des deniers et des oboles pour les types monétaires concernés. Les oboles de Melle sont dissociées des autres sur le graphique.

#### *i - Charlemagne Type 2 (771-793/4)*

Les oboles du Type 2 de Charlemagne de notre *corpus* sont toutes issues de l'atelier de Melle. Leur titre moyen de 88,7 % est similaire à celui des deniers du même type, quel qu'en soit le lieu d'émission (87,9 %). L'écart relativement important entre les valeurs minimale et maximale (Figure 139) suggère qu'une dispersion proche de celle observée pour les deniers apparaîtrait pour un nombre d'analyses d'oboles plus représentatif.

#### *ii - Charlemagne Type 3 (793/4-812)*

Seules deux oboles au monogramme carolin peuvent être attribuées avec certitude au règne de Charlemagne. Il s'agit de Prou 795 et de BnF 1983-44, toutes deux d'Agen. Leurs titres respectifs de 93,1 % et 92,6 % d'argent sont très proches de la valeur moyenne calculée pour les deniers du Type 3 de Charlemagne (92,3 %).

Ces deux résultats sont certes peu représentatifs, mais incitent à penser que les oboles et deniers frappés par Charlemagne après la réforme de 793/4 sont d'une pureté d'argent équivalente.

#### *iii - Louis le Pieux Type 1 (814-818)*

Les deux oboles du Type 1 de Louis le Pieux (814-818) de Toulouse (Prou 804) et de Melle (Prou 714) se distinguent des deniers de la même période (Figure 139). Elles contiennent en effet respectivement 87,9 % et 85,4 % d'argent, alors que la pureté des deniers du même type est d'au moins 90,9 %, ceux de Melle

mis à part. Les moyennes respectives sont de 86,7 % pour les oboles et de 93,5 % pour les deniers non-mellois.

La tendance suggérée ici mériterait d'être confirmée par des analyses complémentaires : la différence de six pourcents entre les moyennes de titre des deniers et des oboles n'est pas négligeable. Il convient donc de s'assurer du regroupement du titre des oboles du Type 1 de Louis le Pieux autour d'une valeur plus basse que celle observée pour les deniers. Il peut en effet s'agir d'une tendance générale pour l'ensemble du monnayage, mais les deux exemplaires analysés peuvent également être des cas particuliers.

#### *iv - Louis le Pieux Type 2 (818-822/3)*

Les oboles du Type 2 de Louis le Pieux (818-822/3) présentent des titres globalement proches de ceux obtenus pour les deniers de la même période (Figure 139). La différence qui s'était dessinée pour le type précédent ne semble pas s'être poursuivie.

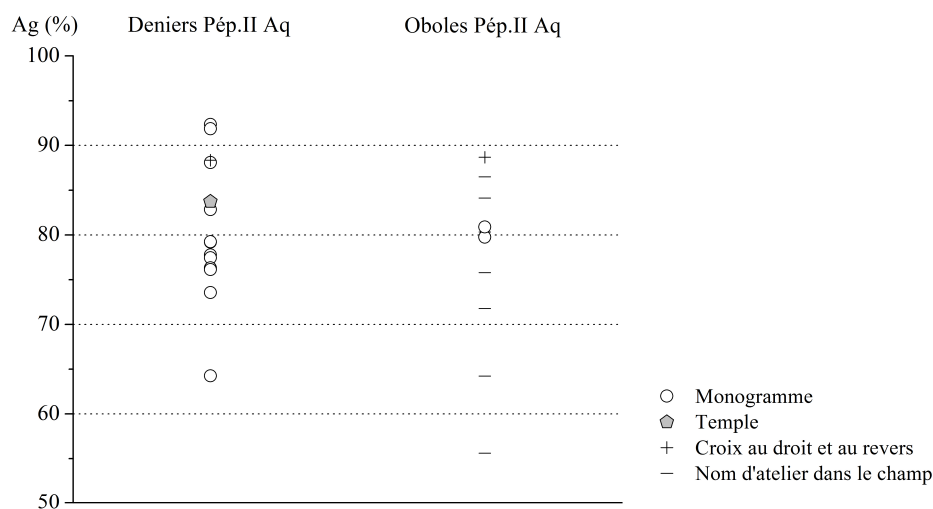
En dehors des oboles de Melle, qui représentent la moitié du *corpus* des demi-deniers des années 818-822/3, et dont le cas est traité séparément, les deux exemplaires d'Arles se différencient des autres. Leurs titres de 86,1 % et de 88,4 % sont les plus bas parmi ceux des dix oboles frappées en dehors de Melle. La moyenne pour Arles est de 87,2 % et celle des autres échantillons de 93,3 %, soit une valeur proche du titre moyen des deniers contemporains (93,5 %). Aucune explication satisfaisante ne permet de justifier la différence observée pour les oboles au nom d'Arles. Il est toutefois remarquable que deux des trois deniers d'Arles analysés du Type 1 de Louis le Pieux ont été identifiés comme faux. Les quatre deniers au monogramme du Type 3 de Charlemagne présentaient quant à eux des titres semblables à la norme définie par ceux des autres ateliers étudiés. Il semble donc que le titre plus faible observé pour les monnaies d'Arles ne concerne que Louis le Pieux, et certains exemplaires seulement.

Si l'on exclut les exemplaires d'Arles et de Melle, les huit autres oboles du Type 2 de Louis le Pieux analysées présentent des titres resserrés et élevés et très proches de ceux des deniers du même type : les moyennes respectives sont de 93,3 % et de 93,5 % d'argent.

#### *v - Pépin II d'Aquitaine (839/852)*

Les oboles de Pépin II d'Aquitaine sont particulièrement nombreuses par rapport à l'ensemble des monnaies analysées de ce souverain : elles représentent plus de la moitié de ce *corpus* d'analyse.





**Figure 140** - Comparaison du titre d'argent des deniers et des oboles de Pépin II d'Aquitaine selon leur type monétaire.

Les résultats obtenus montrent que les deniers et les oboles de Pépin II d'Aquitaine sont d'une pureté équivalente : les moyennes respectives déterminées pour les exemplaires analysés sont de 80,8 % et 77,9 %. L'écart entre les bornes minimale et maximale est important, de l'ordre de 30 % dans les deux cas, et l'écart-type relatif traduit une dispersion significative des valeurs (8,3 % pour les deniers et 13,4 % pour les oboles).

Le type monétaire ne semble pas être corrélé aux variations de titre observées parmi les exemplaires de Pépin II d'Aquitaine analysés. La comparaison entre deniers et oboles d'une même variété est toutefois difficile à partir de notre *corpus* d'analyse : seuls sont représentés par un nombre significatif d'exemplaires les deniers au monogramme pippinide, tandis que les oboles au nom datelier dans le champ sont les seules pour lesquelles une telle étude est envisageable.

Le denier et l'obole de Limoges sur lesquels apparaît une croix entourée par une légende circulaire au droit et au revers présentent des titres d'argent très proches et élevés, de l'ordre de 88 % (Figure 140). Des analyses complémentaires permettraient de confirmer cette tendance. Limoges est un des ateliers ouverts durant le règne de Pépin II d'Aquitaine<sup>481</sup>.

#### *vi - Lothaire (840-855)*

L'unique obole de Lothaire analysée (BnF 658a) est particulière car elle porte le nom d'Aquitaine, ce qui signifie qu'elle est issue d'un atelier situé en

<sup>481</sup> (Coupland, 1989) p. 217. Des deniers de Limoges sont connus pour Charlemagne avant la réforme de 793/4, mais pas après cette date pour ce même souverain ni pour l'ensemble du règne de Louis le Pieux.

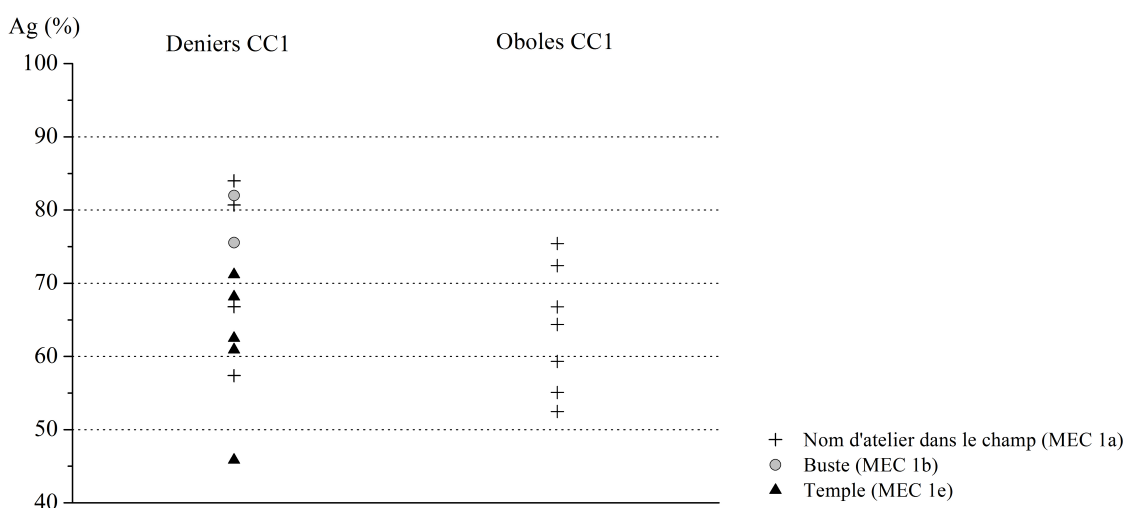
dehors des frontières du royaume de Francie Médiante. Selon Coupland, les oboles de ce type auraient été frappées durant les années de trouble entre la mort de Louis le Pieux en 840 et la signature du traité de Verdun de 843. Ce serait de plus Pépin II d'Aquitaine qui en serait à l'origine et non Lothaire, auquel il était allié<sup>482</sup>. C'est donc davantage à la composition des exemplaires de Pépin II d'Aquitaine qu'il convient de comparer celle de BnF 658a, plutôt qu'aux deniers de Lothaire.

BnF 658a contient 66,4 % d'argent. Cette valeur est comprise dans la gamme définie par les oboles frappées par Pépin II d'Aquitaine et qui portent son nom (60 % à 90 % d'argent), bien que proche de la borne minimale. Le titre de BnF 658a, s'il s'agit bien d'une émission de Pépin II d'Aquitaine, semble confirmer la tendance des oboles à présenter des teneurs en argent plus faibles que les deniers de ce souverain.

Cette seule analyse est toutefois insuffisante pour conclure quant au titre moyen des oboles d'Aquitaine au nom de Lothaire.

*vii - Charles le Chauve Première période (840-864)*

Les cinq oboles de Charles le Chauve antérieures à l'édit de Pîtres de 864 analysées sont du type au nom d'atelier dans le champ au revers (MEC 1a), et proviennent de l'atelier d'« Aquitaine ». Elles présentent des titres plutôt variables, compris entre 52,5 % et 72,4 % d'argent (Figure 141). La moyenne de titre d'argent pour ces cinq oboles est faible (63,7 %), et l'écart-type relatif de 14,2 % traduit une dispersion importante de l'ensemble des valeurs.



**Figure 141** - Représentation graphique du titre d'argent des deniers et oboles de la Première période d'émission de Charles le Chauve selon le type monétaire.

<sup>482</sup> Voir *supra* p. 245.

La moyenne des titres des oboles de Charles le Chauve des années 840-864 est proche de celle des deniers de la même période. La valeur déterminée pour l'ensemble des pièces datées de cette période est de 68,6 %. Cette moyenne est de 72,2 % si l'on considère les seuls deniers de la même variété que les oboles d'Aquitaine (nom d'atelier dans le champ, MEC 1b), ou de 62,1 % si l'on exclut les deux exemplaires mellois dont le titre peut paraître anormalement élevé pour cette période.

L'écart-type relatif montre une dispersion importante du titre des deniers et des oboles (respectivement 17,0 % et 13,4 %). L'évolution suivie par le titre des oboles durant la première partie du règne de Charles le Chauve semble donc identique à celle des deniers. Des analyses complémentaires permettraient de définir plus précisément les bornes minimale et maximale et la moyenne des teneurs.

*viii - Les monnaies au monogramme carolin  
de Charles le Chauve (840-877)*

Les oboles au monogramme carolin attribuées à Charles le Chauve sont similaires aux deniers du même type et du même souverain du point de vue de leur pureté pour la majorité d'entre elles, à l'exception de deux exemplaires : Prou 741 de Bourges et Prou 815 de Toulouse présentent des titres qui les différencient des autres (environ 45 % et 70 %), et qui les rapprochent de la Première période d'émission de Charles le Chauve (840-864). Les autres oboles présentent des titres supérieurs à 90 % (92,6 % en moyenne) qui les rapprochent des deniers du Type GDR et donc de la Deuxième période d'émission de Charles le Chauve

***b. Les éléments mineurs et traces***

Les tendances observées pour les deniers concernant les éléments mineurs et traces sont visibles également pour les oboles, à l'exception des teneurs en or élevées pour les monnaies du Type 2 de Charlemagne : les trois oboles de ce type portent toutes le nom de Melle et, nous le verrons par la suite, les monnaies de cet atelier contiennent d'une manière générale moins d'or que les autres sur l'ensemble de la période étudiée.

Les oboles du Type 3 de Charlemagne et des Types 1 et 2 de Louis le Pieux ne contiennent pas d'élément-trace particulier dans des quantités notables. Les teneurs en éléments mineurs et traces sont similaires à celles relevées pour les deniers de mêmes types.

Parmi les oboles du Type 2 de Louis le Pieux, un des deux exemplaires d'Arles dont le titre s'était révélé relativement faible par rapport aux autres contient une teneur élevée en zinc qui suggère le mélange d'un laiton (BnF 860a avec 1,1 %). Ce n'est pas le cas de l'autre obole de ce même atelier (Prou 860).

Les oboles de Charles le Chauve antérieures à 864 et de Lothaire présentent, comme les deniers des mêmes périodes, des teneurs en zinc très élevées qui traduisent l'emploi de laiton pour affaiblir l'argent.

## 2. Les monnaies de Melle

### *a. Un atelier particulier*

L'étude spécifique des monnaies carolingiennes issues de l'atelier de Melle (79) se justifie par les nombreuses caractéristiques de cet atelier et de ses émissions monétaires.

Le lien existant entre l'atelier de Melle et les mines d'argent situées dans ou autour de cette localité présente un intérêt majeur lorsqu'il s'agit d'analyser des monnaies carolingiennes. Les mines de Melle sont constituées d'un gisement de galène argentifère contenant de 1 à 3 ‰ d'argent, dont l'exploitation peut être établie depuis le VII<sup>e</sup> siècle jusqu'au X<sup>e</sup> siècle<sup>483</sup>. Des deniers au type dit « immobilisé » portant le nom de Melle ont néanmoins été frappés pendant une longue période jusqu'à la fin du XII<sup>e</sup> siècle, c'est-à-dire après l'arrêt de l'exploitation des mines. La comparaison des caractéristiques isotopiques du plomb de monnaies frappées au nom de Melle avec celles de minerais extraits de ce gisement a confirmé que l'argent mellois était utilisé pour la frappe des monnaies dans l'atelier sans être mélangé, ou très peu<sup>484</sup>. A l'époque carolingienne, le gisement de Melle constitue la seule exploitation d'argent d'importance identifiée en Occident. Et si cet argent a approvisionné l'atelier monétaire local et certaines officines proches, il semble que son influence n'ait été que régionale<sup>485</sup>.

Les fouilles menées ces dernières années ont prouvé qu'une exploitation des mines de Melle avait eu lieu dès l'époque mérovingienne<sup>486</sup>. Sous Charlemagne et ses successeurs, l'atelier mellois s'est affirmé comme l'un des principaux émetteurs de monnaies de l'époque carolingienne. Pour la période qui nous intéresse, tout porte à croire que Melle était l'un des ateliers les plus prolifiques :

---

<sup>483</sup> (Téreygeol *et al.*, 2005) p. 49-51.

<sup>484</sup> (Téreygeol *et al.*, 2005) p. 50-55. (Barrandon et Dumas, 1990) p. 906.

<sup>485</sup> (Barrandon et Dumas, 1990) p. 906.

<sup>486</sup> (Téreygeol *et al.*, 2005) p. 53.

les pièces à ce nom sont parmi les plus nombreux dans les trésors, et ce dans l'ensemble de l'empire, pour Charlemagne comme pour Louis le Pieux<sup>487</sup>. Sont ainsi parvenues jusqu'à nous des monnaies frappées au nom de Melle – qu'il soit écrit sous la forme METOLO, METVLLO ou METALLVM – pour ces deux souverains. Un atelier de frappe monétaire de première importance a donc été établi en lien direct avec l'exploitation minière locale, malgré l'absence d'un centre urbain à proximité.

Des trésors relativement lointains renferment des deniers de Melle en proportion non négligeable, témoignant de la circulation rapide des deniers autour de l'an 800 et de l'importance du monnayage mellois. Les deniers et oboles de Melle sont ainsi parmi les plus nombreux dans les trouvailles monétaires de l'époque de Charlemagne et du début du règne de Louis le Pieux jusqu'en 822/3. Il n'est pas possible de quantifier la proportion de monnaies melloises entre 822/3 et 840 : les deniers dits « au temple » qui sont alors frappés ne portent pas la mention de l'atelier émetteur. Parmi l'ensemble du *corpus* des pièces carolingiennes analysées ici, Melle est l'atelier le plus représenté : soixante-sept des quelque cinquante échantillons considérés en portent le nom.

Des éventuelles particularités des monnaies de Melle ont donc été étudiées à la lumière des analyses élémentaires. Leur composition a été comparée à celle des pièces issues des autres ateliers carolingiens. Des possibles spécificités propres à un type monétaire précis, ou caractérisant les oboles par rapport aux deniers, sont également étudiées.

Avant cela, il convient de rappeler les particularités numismatiques des monnaies de Melle qui se révèlent nombreuses. Des différences typologiques existent pour la plupart des types monétaires étudiés pour cet atelier, et des incertitudes demeurent quant à l'attribution de certains exemplaires à un souverain précis.

### ***b. Une typologie complexe***

Le cas de Melle, s'il s'inscrit globalement dans la structure chronologique définie pour la période 751-877, est néanmoins plus complexe, et présente des spécificités qu'il est nécessaire de connaître pour une meilleure interprétation des résultats analytiques.

---

<sup>487</sup> Pour Charlemagne voir (Coupland, 2005) p. 214 et suivantes. Pour Louis le Pieux, (Coupland, 1990) p. 26 et 33.

Une première particularité remarquable des monnaies de Melle réside dans l'évolution du nom de l'atelier tel qu'il apparaît sur celles-ci : ainsi les deniers et oboles de Charlemagne antérieurs à la réforme de 793/4 portent MEDOLVS ou METOLO, avec des variantes dans l'écriture et la disposition, et d'une manière plus ou moins lisible selon les cas. Les monnaies suivantes au monogramme carolin portent quant à elles une légende METVLLO au revers. Sous Louis le Pieux, le nom de l'atelier mellois devient METALLVM sur les oboles comme sur les deniers des Types 1 et 2 (814-818 et 818-822/3). Par la suite, l'orthographe lisible sur les deniers de Charles le Chauve à la légende du revers en deux lignes reste identique (META/LLVM), mais d'autres deniers de ce même souverain, au monogramme carolin et identiques à ceux frappés par Charlemagne entre 793/4 et 812, reprennent l'écriture METVLLO. Des monnaies de Charlemagne portant des légendes différentes, qui pourraient également être attribuées à l'atelier de Melle, présentent d'autres variantes : ce n'est alors pas véritablement le nom de l'atelier qui est inscrit, mais EX METALLO NOVO ou METALL GERMAN<sup>488</sup>.

Pour chaque type de deniers et d'oboles étudié, les spécificités des monnaies melloises sont exposées dans les paragraphes qui suivent afin de faciliter la compréhension de l'interprétation des données analytiques.

(i) - Charlemagne Type 2 (771-793/4)

Avant la réforme de 793/4, plusieurs types de revers peuvent être distingués pour les deniers du Type 2 de Charlemagne frappés dans l'ensemble des ateliers carolingiens. Des variétés de type de revers existent également au sein du monnayage d'un même atelier, en particulier pour Melle. Et dans ce cas, la lecture n'est pas toujours aisée : si certaines légendes sont sans aucun doute gravées en cercle (Prou 681, Prou 682, BnF 388) ou en deux lignes (Prou 687), la lecture est plus problématique pour d'autres exemplaires (Prou 683 et 684 relativement proches, mais également Prou 685 et 686)<sup>489</sup>. On distingue ainsi cinq groupes de deniers mellois de Charlemagne antérieurs à la réforme de 793/4 parmi les neuf exemplaires de la BnF. Nous verrons par la suite si ces différenciations d'ordre numismatique peuvent être corrélées à des particularités de composition chimique.

---

<sup>488</sup> Voir *supra* p. 269.

<sup>489</sup> Voir pour les deniers en relation avec les oboles et pour les différentes lectures proposées (Schiesser, à paraître).

Des oboles correspondant aux deniers antérieurs à la réforme ont semble-t-il également été frappées à Melle par Charlemagne avant 793/4<sup>490</sup>. Trois d'entre elles sont conservées dans la collection nationale française (Prou 678 à 680), et ont donc pu être analysées. L'attribution de ces oboles à Charlemagne est incertaine et a été discutée par le passé ; et si l'on ne peut trancher définitivement pour une attribution carolingienne ou mérovingienne, la similarité des légendes entre ces oboles et les deniers de Charlemagne frappés au nom de Melle à partir de 771 oriente vers une attribution à ce dernier souverain<sup>491</sup>.

Les oboles melloises de Charlemagne antérieures à la réforme de 793/4 présentent la particularité d'être uniface et incuses. En conséquence, seule une des deux faces doit être lue. Il est remarquable que les seules oboles de ce type connues soient issues de l'atelier de Melle, et que le nom de Charlemagne n'y apparaisse pas. La répartition des monnaies telle qu'elle transparait des exemplaires qui sont parvenus jusqu'à nous montre une spécificité melloise générale concernant les oboles sous les premiers carolingiens.

#### (ii) - Charlemagne Type 3 (793/4-812)

Les monnaies melloises au monogramme carolin peuvent être datées des années d'émission du Type 3 de Charlemagne (793/4) ou du règne de Charles le Chauve (840-877). Si une attribution est possible pour des monnaies retrouvées dans des trésors dont la période d'enfouissement ne fait pas de doute, il n'en est pas de même pour les trouvailles isolées, ou pour les exemplaires conservés dans des collections, dont le contexte de découverte est inconnu.

Parmi ces monnaies, des différences existent dans l'exécution de la gravure des coins ayant servi à les frapper ; cela n'est toutefois pas suffisant pour distinguer les exemplaires des deux souverains. Le principal critère qui permet l'attribution de certaines monnaies à l'une des deux périodes est la présence d'une croix, intercalée entre le T et le V de la légende METVLLO pour les deniers (Prou 699 à 701)<sup>492</sup>. L'étude des trésors montre qu'aucun denier de ce type ne figure pour l'époque de Charlemagne ; toutes les monnaies portant cette croix seraient ainsi de Charles le Chauve. Pour les autres, il semble que des exemplaires strictement identiques du point de vue numismatique aient circulé à la fois sous Charlemagne et Charles le

---

<sup>490</sup> (Schiesser, à paraître). Coupland fait mention d'oboles antérieures à la réforme mais insiste sur la difficulté de leur identification : « *It is often difficult to recognise oboles in the pre-reform period because of weight variations among the denarii and the small size of the flans* ». (Coupland, 2005) p. 220. Voir également *supra* p. 222.

<sup>491</sup> (Schiesser, à paraître).

<sup>492</sup> La graphie que nous avons adoptée pour désigner les deniers qui présentent cette variété de légende est METXVLLO, bien que cela puisse également être MET+VLLO ou METxVLLO.

Chauve. Des différences de composition existent-elles ? Peut-être le titre d'argent, ou la teneur d'un ou plusieurs éléments-traces peuvent-ils permettre de différencier ces deniers similaires sur le plan numismatique. Deux deniers au monogramme portant la légende EX METALO NOVO au revers et qui, comme nous l'avons vu précédemment, sont attribuables à Melle, ont également été étudiées.

La plus grande partie des oboles au monogramme carolin porte le nom de Melle. L'étude numismatique ne permet pas de différencier les oboles de Charlemagne de celles de Charles le Chauve, mais, à l'instar des deniers, deux groupes principaux peuvent être distingués parmi elles sur la base de la présence ou non d'une croix, cette fois entre le K et le L du monogramme au droit. Et si les monnaies portant une croix au droit semblent, comme pour les deniers présentant la même croix caractéristique, être indiscutablement de Charles le Chauve, la même incertitude demeure pour les oboles sur lesquelles cette croix n'apparaît pas<sup>493</sup>. Peut-être la connaissance de la composition des monnaies peut-elle contribuer à résoudre cette problématique.

#### (iii) - Charlemagne Type 4 (812-814)

Un type de deniers de Charlemagne au buste et à la titulature impériale peut être associé à l'atelier de Melle. Il s'agit des exemplaires sur lesquels apparaît la légende METALL GERMAN comme mention de lieu d'émission au revers<sup>494</sup>.

#### (iv) - Louis le Pieux Type 1 (814-818)

Pour le Type 1 de Louis le Pieux (814-818), les deniers présentent, d'une manière générale, la titulature impériale en légende circulaire autour du buste de l'empereur au droit. Au revers, les exemplaires mellois portent le nom de l'atelier en cercle autour d'une paire de coins et de marteaux, qui symbolisent la principale caractéristique de cette ville qu'est la métallurgie.

La particularité des monnaies melloises pour le Type 1 de Louis le Pieux vient de certaine variante typologique des oboles. Celles-ci ne présentent pas, comme celles des autres ateliers et de la même période, des types de droit et de revers identiques à ceux des deniers contemporains : le buste de l'empereur

---

<sup>493</sup> Le style des oboles avec une croix est en effet proche de celui des exemplaires de Pépin II (MEC 1.815, p. 532 et Pl. 37), frappés en Aquitaine entre 839 et 852, c'est-à-dire durant le début du règne de Charles le Chauve. De plus, les trésors contenant des oboles au monogramme portant une croix au droit contiennent tous des monnaies postérieures. Enfin, aucune des oboles au monogramme carolin présente dans des trésors que les autres monnaies tendent à attribuer à l'époque de Charlemagne ne porte de croix au droit.

<sup>494</sup> Voir *supra* p. 271.



n'apparaît pas sur leur droit. Néanmoins, ce type d'obole se différencie du suivant par la présence au revers de marteaux et de coins, que l'on ne retrouve sur les deniers que pour la période 814-818. C'est donc bien durant ces années que ces oboles melloises ont été frappées. Ici encore, une spécificité des oboles de ce type au nom de Melle du point de vue de la composition chimique est étudiée.

(v) - Louis le Pieux Type 2 (818-822/3)

Les monnaies du Type 2 de Louis le Pieux sont plus abondantes que les précédentes, en particulier du fait de l'existence de deux importants trésors qui ont largement contribué à la connaissance de ce monnayage. Le nombre de deniers qu'il a été possible d'analyser est en conséquence plus important que pour le type précédent, en particulier pour Melle (neuf exemplaires).

Deux types de revers peuvent être distingués parmi les deniers de ce type portant le nom de Melle : pour la majorité d'entre eux (dans notre cas huit exemplaires sur neuf), la légende du revers est META/LLVM en deux lignes ; pour les autres (Prou 720 seulement dans notre *corpus*), le nom de l'atelier est inscrit en cercle autour d'une croix<sup>495</sup>. Cette particularité, que l'on retrouve également sur des deniers de Toulouse, a été interprétée par Grierson et Blackburn comme une erreur ou une mauvaise compréhension des monnayeurs<sup>496</sup>.

Comme pour les deniers correspondants, les oboles du Type 2 de Louis le Pieux sont plus nombreuses que celles du type précédent<sup>497</sup> – même si leur nombre reste globalement plus restreint que celui des deniers, dans les trésors comme dans les collections. Néanmoins, la particularité du monnayage mellois concernant les oboles évoquée pour les types précédents est également visible pour celui-ci. Il a ainsi été possible d'analyser dix oboles melloises frappées entre 818 et 822/3, soit une de plus que le nombre de deniers contemporains. Melle est le seul atelier pour lequel le nombre de deniers et d'oboles conservés à la BnF est comparable.

La composition chimique des oboles melloises a été comparée à la fois à celle des deniers contemporains portant aussi le nom de Melle, mais également à celle des oboles et deniers de la même période issus d'autres ateliers de l'empire carolingien. Et ici encore, le cas de Melle s'est avéré particulier : on trouve ainsi

---

<sup>495</sup> Le denier conservé au Cabinet des Médailles sous la référence Prou 720 ne correspond pas à la description qui en est faite dans le catalogue des monnaies carolingiennes de la BnF de Prou : dans cet ouvrage, la légende relevée pour le revers est en deux lignes ; la monnaie contenue dans le médaillier carolingien de la collection nationale française présente bien une légende circulaire, comme cela est écrit dans notre texte et dans notre Catalogue. Voir Prou p. 100.

<sup>496</sup> MEC p. 215

<sup>497</sup> (Coupland 1990) p. 29 : « *The production of oboles seems to have further increased at this time* ».

des oboles portant au droit le nom de l'empereur en cercle et la légende METALLVM au revers, circulaire elle aussi. Ce type d'obole est identique à celui des deniers peu abondants présentés plus haut comme une erreur des monnayeurs. Le second type d'oboles melloises du Type 2 de Louis le Pieux présente une disposition des légendes inverse de celle des deniers de la même période les plus nombreux : ainsi, le droit porte une légende de type LVDO/VVIC, en deux lignes le plus souvent, et le revers +METALLVM en cercle autour d'une croix.

(vi) - Pépin II d'Aquitaine (839-852)

Des monnaies de Pépin II d'Aquitaine ont été frappées au nom de Melle : les deniers portent au droit une titulature royale du type PIPINVS REX EQ en cercle autour d'une croix, et METVLLO inscrit autour du monogramme pippinide au revers.

Pour les oboles, le droit est rempli par ce même monogramme, et le nom de l'atelier de frappe apparaît au revers autour d'une croix. Des pièces au temple et à la légende chrétienne que Coupland distingue des autres sur la base de critères stylistiques auraient également été frappées à Melle par Pépin II d'Aquitaine<sup>498</sup>.

(vii) - Charles le Chauve (840-877)

Les monnaies melloises de Charles le Chauve peuvent être séparées en trois groupes : les pièces frappées durant la Première période d'émission de ce souverain (840-864), au nom d'atelier dans le champ en deux lignes au revers (Prou 726 et Prou 727), auxquelles peut s'ajouter l'unique exemplaire connu de cet atelier au temple<sup>499</sup> ; les monnaies au monogramme carolin qui peuvent être attribuées au règne de Charles le Chauve dans son ensemble, mais pas à l'une de ses deux périodes d'émission ; les monnaies au monogramme carolin qui peuvent avoir été frappées sous Charlemagne ou sous Charles le Chauve.

C'est la présence d'une croix caractéristique, dans la légende METVLLO au revers pour les deniers, et entre le K et le L du monogramme au revers pour les oboles, qui permet d'attribuer certains des exemplaires au monogramme carolin à Charles le Chauve plutôt qu'à Charlemagne.

---

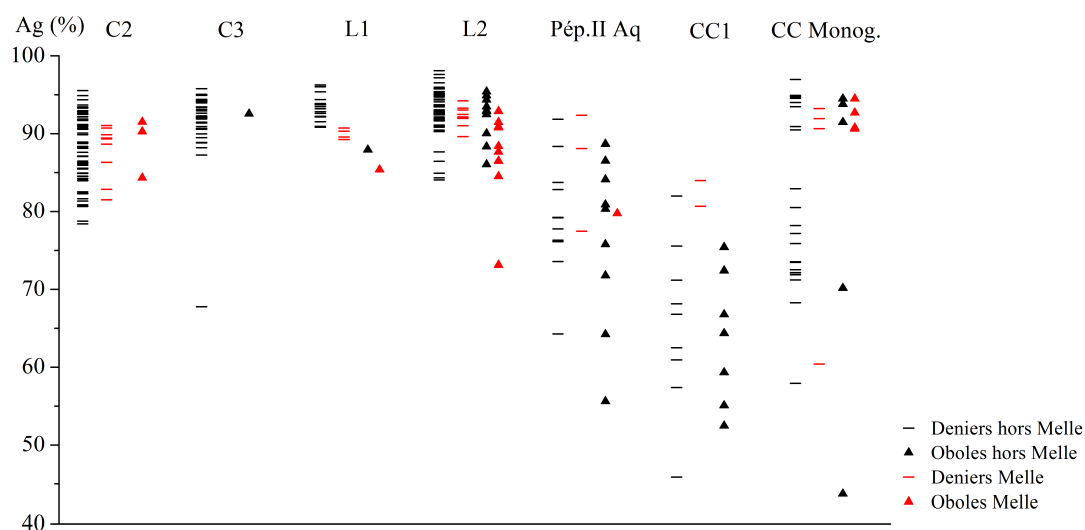
<sup>498</sup> Deniers du type de Prou 1056. Voir (Coupland, 1989) p. 207-208.

<sup>499</sup> Cité par MEC p. 237. Les auteurs de cet ouvrage en datent l'émission aux premiers mois de l'année 840.

### c. Le titre d'argent

Le titre d'argent des monnaies de Melle a été étudié, et comparé à celui des exemplaires des autres ateliers monétaires. Les résultats analytiques ainsi que notre interprétation sont présentés chronologiquement par type, deniers puis oboles, dans les paragraphes qui suivent.

La Figure 142 présente la comparaison des titres d'argent des deniers et oboles de Melle et des autres ateliers pour les sept types monétaires ou périodes d'émissions considérés : Charlemagne Types 2 et 3, Louis le Pieux Types 1 et 2, Pépin II d'Aquitaine, Charles le Chauve Première période et les monnaies au monogramme carolin attribuées à Charles le Chauve. La monnaie supposée de Melle du Type 4 de Charlemagne n'apparaît pas ici : son cas spécifique du point de vue du titre d'argent a été discuté plus haut<sup>500</sup>. Le cas des pièces au monogramme carolin de période d'émission incertaine a été traité séparément.



**Figure 142** - Comparaison des titres des deniers et oboles de Melle et des autres ateliers pour les monnaies du Type 2 de Charlemagne, des Types 1 et 2 de Louis le Pieux, de Pépin II d'Aquitaine, de la Première période d'émission de Charles le Chauve et de celles au monogramme carolin attribuées à ce dernier souverain.

#### (i) - Charlemagne Type 2 (771-793/4)

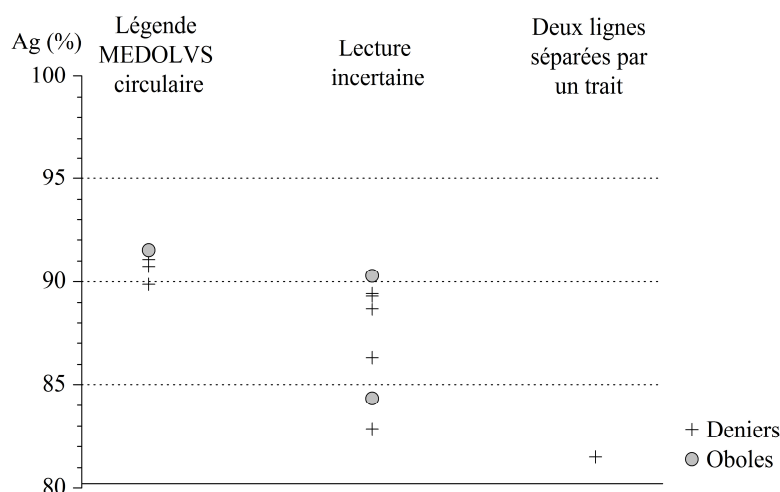
Les monnaies de Melle de Charlemagne frappées avant la réforme de 793/4 présentent des titres cohérents avec les deniers des autres ateliers (Figure 142). Les oboles de Melle contiennent en moyenne 88,7 % d'argent, les deniers du même atelier 87,8 % et les deniers d'autres origines 88,0 %.

<sup>500</sup> Voir *supra* p. 322.

La comparaison entre le titre des oboles de Melle et celui des demi-deniers qui portent le nom d'autres ateliers n'est pas possible : aucune obole de ce type frappée ailleurs qu'à Melle n'est incluse dans notre *corpus* d'analyse.

Les titres des deniers et oboles qui présentent des dispositions différentes des légendes de revers sont comparés sur la Figure 143. Les deniers dont la légende MEDOLVS au revers est inscrite en cercle (Prou 681, Prou 682 et BnF 388) sont distingués de ceux qui portent le nom de Melle selon une disposition incertaine (Prou 683, Prou 684, Prou 685, Prou 686 et BnF 389), et de celui dont le nom de lieu d'émission est en deux lignes séparées par un trait horizontal (Prou 687). Pour les oboles, l'exemplaire à la légende circulaire sur la seule face frappée (Prou 678) est séparé des deux pièces dont la lecture prête à discussion (Prou 679 et Prou 680).

La Figure 143 met en évidence un regroupement des titres des deniers et obole dont la légende caractéristique est circulaire. Les valeurs déterminées sont comprises entre près de 90 % et 92 %, et la moyenne est de 90,8 %.



**Figure 143** - Représentation graphique du titre des monnaies de Melle du Type 2 de Charlemagne selon le type de disposition de la légende au revers.

La dispersion des teneurs en argent est plus importante pour les exemplaires dont la lecture de la légende, au revers pour les deniers et sur la seule face frappée pour les oboles, est incertaine. Les titres déterminés sont compris entre 82 % et 91 %, et la moyenne est de 87,3 %. Le denier Prou 687, seul exemplaire de Melle du Type 2 de Charlemagne analysé dont la légende au revers est en deux lignes séparées par un trait, présente le titre d'argent le plus faible (81,5 %).

La comparaison des titres des monnaies de Melle selon le type de légende caractéristique met en évidence des éléments intéressants : il semble que les exemplaires dont le nom d'atelier est inscrit en cercle présentent des titres proches

et élevés, tandis que les valeurs sont plus dispersées et en moyenne plus faibles pour ceux dont la lecture du lieu d'émission est discutable. Le seul exemplaire sur lequel le nom de Melle est inscrit en deux lignes séparées par un trait est le moins pur de tous. Si ces tendances reflètent la réalité de la frappe des monnaies du Type 2 de Charlemagne à Melle, elles sont insuffisantes pour proposer une chronologie de ces émissions basée sur une corrélation de leurs caractéristiques typologiques et de pureté.

Le nombre des analyses considérées pour chacune des variantes est toutefois peu élevé, et des analyses complémentaires sont nécessaires pour confirmer les tendances qui ressortent de nos résultats. Il est possible qu'un nombre de résultats plus conséquents mette en évidence une dispersion similaire du titre d'argent des deniers et oboles de Melle du Type 2 de Charlemagne, quelle que soit la disposition des légendes au revers.

(ii) - Charlemagne Type 3 (793/4-812)

Certaines des monnaies de Melle au monogramme carolin de notre *corpus* datent très vraisemblablement de la période d'émission du Type 3 de Charlemagne. L'étude numismatique ne permet pas de distinguer ces pièces de celles identiques de Charles le Chauve ; les monnaies melloises au monogramme carolin sont donc traitées séparément et n'apparaissent pas sur la Figure 142. Les deniers et oboles du Type 3 de Charlemagne d'autres ateliers apparaissent sur cette figure uniquement à titre indicatif.

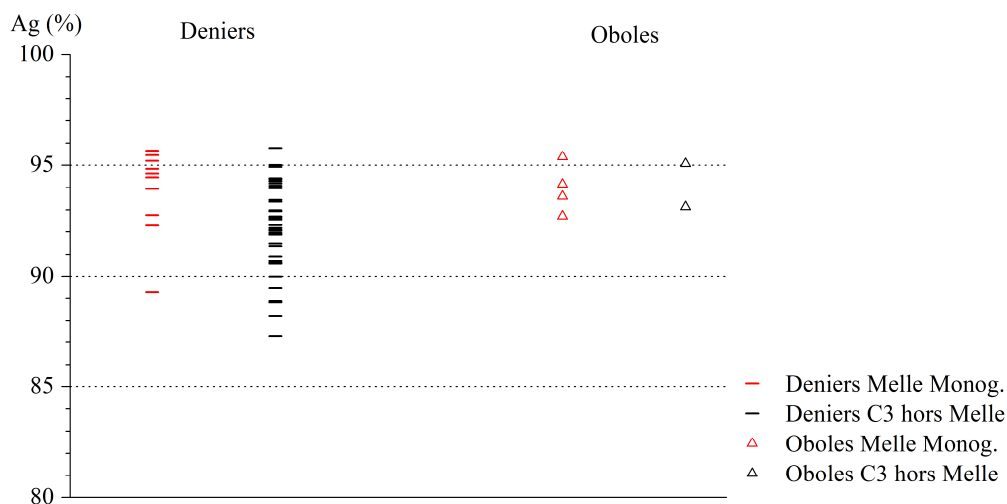
La bonne homogénéité du titre des monnaies de Melle au monogramme carolin de période de frappe incertaine, donc sans croix caractéristique, permet toutefois de comparer leur titre avec celui des pièces du Type 3 de Charlemagne : une fraction au moins des exemplaires mellois analysées au monogramme carolin peut probablement être datée de la période 793/4-812. La comparaison entre les titres déterminés pour ces pièces de Melle et pour celles du Type 3 de Charlemagne des autres ateliers est présentée sur la Figure 144. Le denier au monogramme Prou 576 qui se distingue de son groupe numismatique est exclu de la Figure 144, et des considérations et calculs qui suivent<sup>501</sup>.

L'examen de la Figure 144 montre une très bonne cohérence entre les deniers et oboles du Type 3 de Charlemagne et au monogramme carolin de période d'attribution incertaine de Melle du point de vue du titre d'argent. Les moyennes sont de 92,7 % pour les deniers du Type 3 de Charlemagne, de 92,9 % pour les

---

<sup>501</sup> Voir *supra* p. 320 sur Prou 576.

oboles de la même période, et pour les deniers et oboles au monogramme carolin de Melle respectivement de 93,9 % et de 94,0 %.



**Figure 144** - Représentation graphique du titre d'argent des deniers et oboles au monogramme carolin de Melle, et du Type 3 de Charlemagne des autres ateliers.

Certaines des monnaies au monogramme carolin de période d'attribution incertaine ne sont vraisemblablement pas du Type 3 de Charlemagne ; il est toutefois probable qu'une partie des exemplaires analysés soit de cette période. Pour ces monnaies, la comparaison avec les deniers et oboles dont la frappe entre 793/4 et 812 est avérée, montre que les titres des pièces des deux groupes sont très proches. Il ne semble donc pas y avoir de spécificité melloise du point de vue du titre d'argent pour les monnaies du Type 3 de Charlemagne.

### (iii) - Charlemagne Type 4 (812-814)

Un des deniers classés parmi ceux du Type 4 de Charlemagne par Grierson et Coupland pourrait être de Melle<sup>502</sup>. Si cette attribution est exacte, son titre est légèrement plus faible que celui des autres deniers du même type : il contient 93,4 % d'argent alors que les trois autres sont purs à plus de 96 %.

Cette valeur est toutefois élevée et le léger écart mesuré avec les deniers dont l'attribution au Type 4 de Charlemagne est indiscutable n'est pas suffisant pour proposer une révision de son attribution.

<sup>502</sup> (Grierson, 1967) p. 521 et Pl. I n° 24. (Coupland, 2005) p. 224 et Pl. I n° 2. Voir également *supra* p. 271.

(iv) - Louis le Pieux Type 1 (814-818)

Les quatre deniers mellois de Louis le Pieux au buste analysés ont révélé les quatre titres d'argent les plus faibles pour ce type parmi les deniers de l'ensemble de l'empire carolingien (Figure 142). La moyenne pour Melle est inférieure à 90 %, alors qu'elle est de 93,5 % pour les autres deniers du même type analysés. Ces valeurs semblent montrer que le titre des deniers de Melle du Type 1 de Louis le Pieux est légèrement plus faible que celui des monnaies similaires issues d'autres ateliers. Cette tendance mériterait d'être confirmée par des analyses complémentaires, néanmoins il nous semble, au vu de la disposition des points correspondant à ces deniers reportés sur la Figure 142, que cette tendance est nette et reflète la réalité de la frappe des deniers entre 814 et 818.

En est-il de même pour les oboles ? Rappelons que seuls deux exemplaires correspondant aux deniers du Type 1 de Louis le Pieux ont pu être analysés, l'un de Melle et l'autre de Toulouse. Il s'est avéré que le titre de ces deux oboles est assez nettement plus faible que celui des deniers frappés durant la même période. Ainsi la pièce melloise a révélé un titre de 85,4 %, et la toulousaine 87,9 %. Le titre moyen des deniers de la même période, en dehors de ceux de Melle, est supérieur de plus de cinq pourcents à la moyenne définie par ces deux valeurs (86,7 %), à 93,5 %.

Ces résultats sont insuffisants pour conclure que les oboles de la période 814-818 sont généralement d'un titre plus faible que les deniers contemporains, néanmoins l'écart important observé entre les titres des deux espèces est un élément nouveau et mériterait d'être approfondi par des analyses complémentaires. La rareté des pièces de ce type constitue un obstacle important pour envisager une telle étude.

(v) - Louis le Pieux Type 2 (818-822/3)

La relative abondance des monnaies du Type 2 de Louis le Pieux dans la collection du Cabinet des Médailles, pour Melle comme pour les autres ateliers de l'empire, et pour les deniers comme pour les oboles, permet de raisonner sur un nombre d'échantillons représentatif des pièces en circulation durant cette période.

La moyenne du titre des deniers de Melle du Type 2 de Louis le Pieux (92,2 %) est sensiblement identique à celle déterminée pour les pièces similaires de la même période (93,5 %), bien que très légèrement inférieure. Les deniers de Melle du Type 2 de Louis le Pieux contiennent d'une manière générale une quantité d'argent proche de celle des exemplaires des autres ateliers. Il semble donc que la différence observée du point de vue du titre d'argent entre les pièces de

Melle et celles de autres ateliers pour le Type 1 de Louis le Pieux ne se poursuive pas après 818. Des analyses complémentaires de deniers du Type 2 de Louis le Pieux permettraient de confirmer cette tendance.



**Figure 145** - Comparaison du titre des monnaies du Type 2 de Louis le Pieux pour les deniers de Melle et d'autres ateliers, et les oboles de Melle et d'autres ateliers selon les différents types de disposition des légendes.

L'interprétation des résultats obtenus pour le titre des oboles du Type 2 de Louis le Pieux est plus complexe encore que celle relative aux deniers.

Deux variétés de type ont existé pour les exemplaires mellois de ce type comme pour ceux des autres ateliers de frappe carolingiens. Pour Melle, on trouve dans des proportions semblables des oboles sur lesquelles apparaît le nom de Louis, le plus souvent en deux lignes au droit, et au revers le nom de l'atelier en cercle, et pour les autres les deux légendes de droit et de revers en cercle autour d'une croix. Pour les autres ateliers, les deux principaux groupes sont composés pour l'un d'oboles sur lesquelles le nom de l'atelier est inscrit en deux lignes au revers, et pour l'autre de pièces qui portent la légende LVDO/VVIC en deux lignes au droit. Dans les deux cas, la légende qui n'est pas inscrite dans le champ en deux lignes est disposée en cercle autour d'une croix.

Nous avons vu que l'interprétation du titre des oboles non melloises, quelle qu'en soit la variété, est complexe : deux échantillons au nom d'Arles se distinguent en effet des autres qui forment un groupe homogène centré sur une valeur moyenne identique à celle calculée pour les deniers (93,3 % contre



93,5 %) <sup>503</sup>. Aucune corrélation n'est visible entre le titre de ces pièces et la disposition de leur légende.

Pour Melle, une première remarque concerne l'obole BnF 1982-64 : celle-ci, bien visible sur la Figure 145, ne contient que 73,1 % d'argent, soit un écart supérieur à dix pourcents avec l'obole melloise la moins riche en argent. La teneur élevée en zinc de cet échantillon (1,9 %) montre l'ajout de laiton à l'argent pour l'affaiblir. Nous l'avons vu, ce type de pratique est courant après 840 sous Lothaire et Charles le Chauve, mais pas sous Louis le Pieux. La gravure particulière de cette pièce, ainsi ses singularités de composition, nous incitent à penser qu'il s'agit d'un faux. BnF 1982-64 n'a donc pas été intégré aux calculs et interprétations qui suivent.

Pour les oboles de Melle considérées comme authentiques, une différence apparaît au regard de leur titre entre les pièces dont la légende au droit est en cercle et celles pour lesquelles le nom de l'empereur est inscrit en deux lignes sur cette même face (Figure 145). Les demi-deniers mellois sur lesquels les deux légendes de droit et de revers sont inscrites en cercle sont toutes moins pures que celles qui portent au droit une légende en deux lignes. Les teneurs en argent déterminées pour les premières sont comprises entre 84 % et 89 %, tandis que les autres contiennent de 90 % à 92 % de métal précieux. Dans les deux cas, les moyennes de titre sont inférieures à celle qui caractérise le groupe homogène des oboles issues d'autres ateliers (93,3 %) : 86,7 % pour celles de Melle à la légende en cercle au droit, 91,1 % pour celles de ce même atelier à la légende en deux lignes au droit également. Les oboles melloises à la légende en cercle au revers présentent une moyenne de titre équivalente à celle calculée pour les deniers de ce même atelier (91,1 % contre 92,2 %), tandis que celles à la légende circulaire sur cette face sont moins riches en argent de près de cinq pourcents.

Ces observations mériteraient d'être confirmées par un nombre d'analyses complémentaires au moins équivalent à celui des échantillons de notre *corpus*. Il semble néanmoins au vu de nos résultats que, contrairement aux exemplaires issus d'autres ateliers, une corrélation existe entre le titre des oboles de Melle et la disposition des légendes sur ces pièces. La faiblesse relative du titre de ces monnaies par rapport aux exemplaires similaires d'autres ateliers tend à montrer que la tendance des pièces au nom de Melle à contenir légèrement moins d'argent que les autres durant la période 814-818 se poursuit jusqu'en 822/3, au moins pour les oboles

La corrélation entre les variétés de type des oboles de Melle des années 818-822/3 avec leur titre d'argent pose plusieurs questions. Toutes ces oboles ont-

---

<sup>503</sup> Voir *supra* p. 366.

elles bien toutes été frappées au sein d'un même atelier ? Deux officines ont-elles coexisté à Melle, frappant des oboles de type et de titre différents ? Ou bien cela reflète-t-il une évolution dans le temps, sur une période certes relativement brève ? Et l'argent utilisé était-il bien mellois dans les deux cas ? L'étude des éléments mineurs et traces, ainsi que quelques analyses des rapports isotopiques du plomb, pourraient sans doute en dire davantage.

(vi) - Pépin II d'Aquitaine (839-852)

Les monnaies de Melle sont relativement peu représentées parmi celles de Pépin II d'Aquitaine qui portent la mention d'un lieu d'émission précis. Seuls trois deniers et une obole de cet atelier ont pu être analysés.

Les résultats obtenus semblent montrer que les alliages constituant les pièces de Melle sont légèrement plus purs que ceux des exemplaires des autres ateliers (Figure 142). Les deniers de Melle contiennent en moyenne 86,0 % d'argent, et ceux des autres ateliers d'Aquitaine 79,4 % pour la même période. Pour les oboles, la moyenne est de 77,7 % pour les exemplaires frappés en dehors de Melle et le titre de l'unique pièce melloise analysée de 79,8 %.

Le titre moyen des deniers mellois de Pépin II d'Aquitaine est proche de celui déterminé pour les deux exemplaires de la Première période d'émission de Charles le Chauve frappés à Melle, à la légende bi-linéaire au revers (86,0 % contre 82,3 %). Ces deux valeurs sont en outre relativement peu éloignées de la moyenne des titres des deniers analysés du Type 3 de Louis le Pieux (87,3 %) – du moins plus proches que les teneurs en argent des monnaies de Charles le Chauve de la Première période frappées en dehors de Melle, et que celles des exemplaires de Lothaire. La comparaison de l'ensemble de ces résultats suggère que l'atelier de Melle pourrait avoir maintenu un standard de pureté d'argent supérieur à 80 % dans ses monnaies pour l'ensemble de la période 840-864. Dans le même temps, le titre des émissions des autres ateliers de Francie Occidentale ou de Francie Médiante aurait largement chuté, jusqu'à 60 % environ semble-t-il.

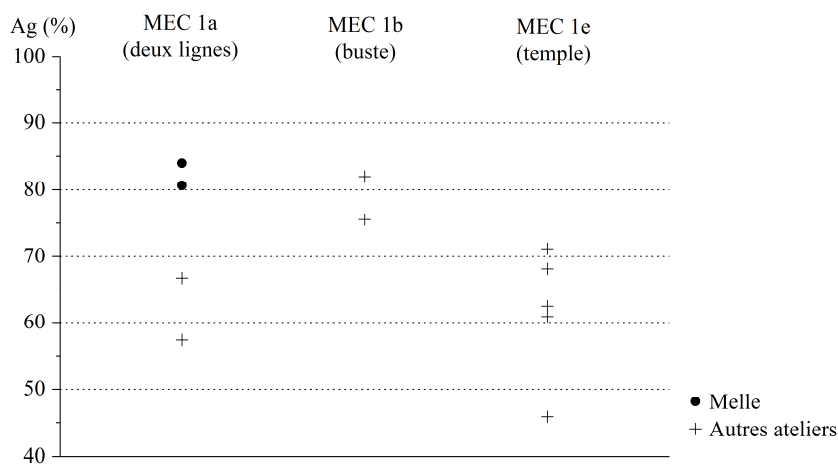
(vii) - Charles le Chauve Première période (840-864)

Les monnaies melloises de Charles le Chauve attribuables avec certitude aux années 840-864 sont celles au nom d'atelier en deux lignes au revers (Type MEC 1a<sup>504</sup>). Des deniers et oboles au monogramme carolin ont très probablement

---

<sup>504</sup> Pour la présentation des types monétaires de Charles le Chauve de la période 840-864 voir *supra* p. 247 et suivantes.

été frappés à Melle durant cette période, mais leur datation est incertaine. Seuls les deniers mellois à la légende bi-linéaire au revers sont traités dans ce paragraphe.



**Figure 146** - Représentation graphique du titre des deniers de Melle de la Première période d'émission de Charles le Chauve, en comparaison avec les exemplaires de la même période des autres ateliers étudiés.

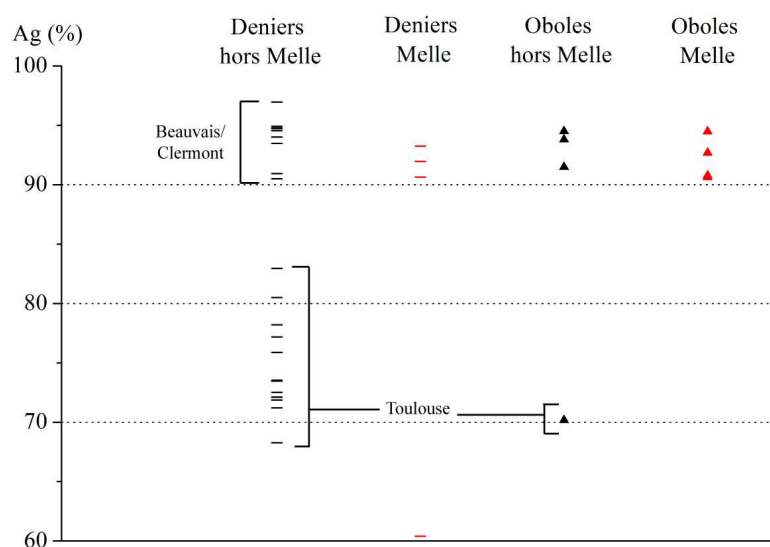
Deux deniers au nom de Melle de notre *corpus* peuvent être attribués avec certitude à la Première période du règne de Charles le Chauve : Prou 726 et Prou 727. Le titre d'argent de ces deux pièces les distingue de celles de la même période, de la même variété et issues d'autres ateliers du même territoire (Figure 146) : les deniers mellois contiennent entre 80 % et 85 % d'argent tandis que les autres du même sous-type contiennent entre 45 % et 70 % de métal précieux. Avec les deux deniers au buste de Bourges, ces deux pièces melloises sont les plus pures pour l'ensemble de celles analysées de la période 840-864. Les deux pièces de Melle présentent de plus des titres proches, alors que les valeurs obtenues pour les autres exemplaires de la même période montrent une très grande diversité de teneurs en argent.

Ici encore, le faible nombre de monnaies considérées incite à la prudence quant à la généralisation des tendances observées. Celles-ci doivent être confirmées par des analyses complémentaires portant sur un *corpus* bien plus large de deniers de Melle de Charles le Chauve à la légende bi-linéaire au revers. Si les tendances reflètent la réalité de la frappe monétaire à Melle entre 840 et 864, il s'agirait d'une inversion de ce qui avait été observé pour les monnaies du début du règne de Louis le Pieux, qui avait montré un titre légèrement inférieur des émissions melloises par rapport à celles des autres ateliers de l'empire carolingien.

(viii) - Les monnaies au monogramme carolin  
de Charles le Chauve (840-877)

Les deniers au monogramme carolin de notre *corpus* qui peuvent être attribués à Charles le Chauve plutôt qu'à Charlemagne sont ceux à la croix caractéristique dans le nom d'atelier pour Melle (METXVLLLO). Pour les autres ateliers monétaires, les deniers de notre *corpus* attribuables à Charles le Chauve sont ceux de Toulouse à la légende TOLVSACIVI, de Bourges à la légende BITVRICESCIVI, et tous ceux de Beauvais et de Clermont. Les oboles au monogramme attribuées à Charles le Chauve sont celles qui portent une croix caractéristique au droit pour Melle, et celles dont le monogramme est au centre du nom de lieu d'émission pour Bourges, Toulouse et Clermont.

Le titre des deniers et oboles de Melle attribués à Charles le Chauve est comparé à celui des exemplaires des autres ateliers sur la Figure 147<sup>505</sup>.



**Figure 147** - Comparaison du titre d'argent des deniers oboles de Charles le Chauve au monogramme carolin de Melle avec les exemplaires des autres ateliers.

Trois des quatre deniers de Melle attribuables au règne de Charles le Chauve, ainsi que les oboles similaires, présentent des titres élevés et similaires compris entre 90 % et 95 % d'argent, à l'exception de l'exemplaire BnF 1996-115 qui ne contient que 60 % de métal précieux environ. Les deniers de Melle se rapprochent du point de vue de leur titre des exemplaires de Beauvais et Clermont, dont la frappe après 864 est avérée, et se différencient des pièces analysées de l'atelier de Toulouse, qui ont probablement été émises avant cette date. Il en est de même pour les oboles melloises. Ces résultats semblent donc montrer que

<sup>505</sup> L'exemplaire de titre faible Prou 741 (obole de Bourges) n'apparaît pas sur cette figure.

l'ensemble des deniers et oboles de Melle de notre *corpus* attribués à l'ensemble du règne de Charles le Chauve d'après l'étude numismatique serait postérieur à 864, à l'exception de BnF 1996-115. Des analyses complémentaires de monnaies issues de trésors datées de chacune des deux principales périodes d'émission de Charles le Chauve permettraient de confirmer ces observations.

(ix) - Interprétation des particularités de titre des monnaies de Melle

L'étude spécifique du titre d'argent des monnaies carolingiennes de Melle met en évidence des particularités de cet atelier pour plusieurs types monétaires : les exemplaires mellois des Types 1 et 2 de Louis le Pieux semblent contenir légèrement moins d'argent que ceux des autres ateliers ; les pièces de Melle de Pépin II d'Aquitaine et de la Première période d'émission de Charles le Chauve sont au contraire, pour celles que nous avons analysées, plus pures que les autres.

Il semble que le début du règne de Louis le Pieux ne soit pas la seule période durant laquelle les monnaies au nom de Melle contiennent moins d'argent que les autres : Dumas-Dubourg rapporte en effet, d'après l'analyse de pièces du trésor de Bonnevaux, que les exemplaires mellois datés de la fin du IX<sup>e</sup> siècle sont moins purs que les autres<sup>506</sup>.

Le titre plus faible des monnaies de Melle durant les premières années du règne de Louis le Pieux peut sembler contradictoire avec le statut de cet atelier monétaire, en lien direct avec la principale source d'argent de l'empire carolingien : c'est à Melle plutôt que partout ailleurs qu'une pénurie d'argent est la moins probable. Mais c'est peut-être justement le statut particulier de l'atelier monétaire de Melle qui pourrait être à l'origine du titre plus faible des pièces qui en sont issues durant les années 814-822/3. Le contrôle de la fabrication monétaire y était peut-être moins poussé. Ou, du fait de l'activité minéralurgique et métallurgique qui s'y pratiquait pour fabriquer des deniers depuis le minerai de plomb argentifère, qui implique une chaîne opératoire complexe et nécessite des infrastructures spécifiques, une fraude y était-elle facilitée.

Après la mort de Louis le Pieux en 840, les monnaies des deux souverains d'Aquitaine et de Francie Occidentale qui ont dominé tour à tour la région de Melle, semblent au contraire contenir davantage d'argent que les autres exemplaires des royaumes concernés. Durant ces années d'insécurité liée aux troubles politiques et militaires internes et aux incursions nordiques, un titre

---

<sup>506</sup> « Les résultats de la fonte du trésor de Bonnevaux composé dans sa majorité de pièces de Melle font penser que même au IX<sup>e</sup> siècle, cet atelier avait tendance à monnayer à un titre plus faible que le reste du royaume. » dans (Dumas-Dubourg, 1971) p. 41 n. 6.

d'argent relativement élevé semble avoir été maintenu à Melle et à Bourges par Charles le Chauve. Les autres officines semblent en revanche avoir peiné à se conformer à un standard de pureté du même niveau.

Le titre des monnaies au monogramme carolin attribuées à Charles le Chauve incite à les attribuer, à l'exception de deux exemplaires de titre nettement plus faible, à la Deuxième période d'émission de ce souverain après 864, plutôt qu'à la Première. Pour ces pièces de titre élevé, il semble qu'une légère tendance puisse être observée : les deniers et oboles de Melle qui ont été analysés contiennent en moyenne deux à trois pourcents d'argent en moins que les autres exemplaires.

L'analyse d'un *corpus* conséquent de monnaies du Type 3 de Louis le Pieux attribuables à Melle ainsi qu'aux autres ateliers émetteurs de ce type permettrait de confirmer les deux tendances observées, et de situer la période durant laquelle le changement de tendance s'opère.

#### *ii - Les éléments mineurs et traces*

Deux éléments mineurs et traces se sont révélés particulièrement intéressants lors de l'étude spécifique des compositions des monnaies de Melle : l'or et le zinc. D'une manière générale, les pièces melloises présentent des teneurs moindres pour ces deux éléments que les exemplaires des autres ateliers.

Soixante-douze monnaies de l'ensemble de notre *corpus* d'environ quatre cents échantillons proviennent de Melle, ou sont supposées être issues de cet atelier. Vingt-six des cinquante pièces les moins riches en zinc portent le nom de Melle, ou pourraient être melloises. Cette valeur s'élève à trente-six pour l'or. La représentation graphique de ces données pour chaque type monétaire ou période d'émission permet de visualiser ces différences.

#### (i) - Charlemagne Type 2 (771-793/4)

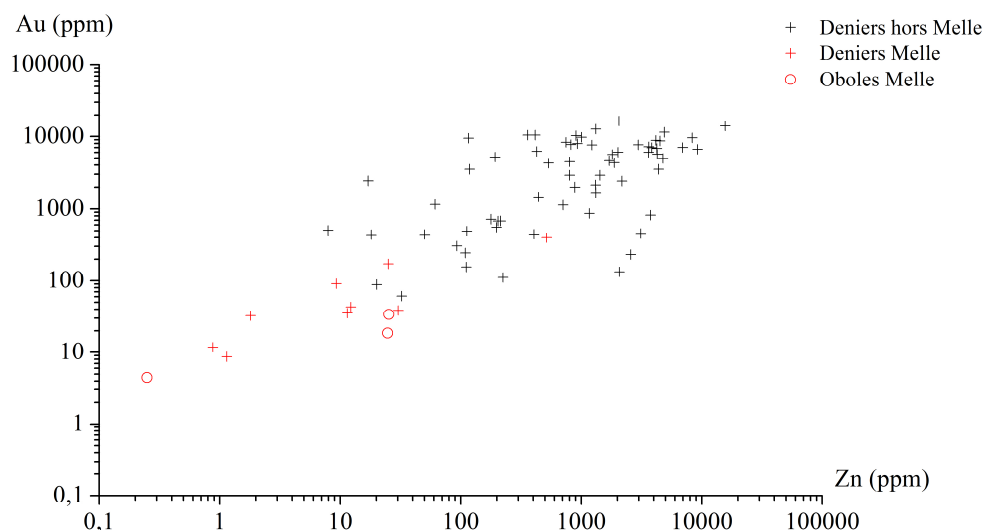
Les monnaies de Charlemagne du Type 2 de l'ensemble des ateliers carolingiens, comme celles de Pépin le Bref des années précédentes, présentent des teneurs en or plus élevées que celles qui seront observées pour les types monétaires ultérieurs<sup>507</sup>. Ce n'est pas le cas pour les deniers et oboles au nom de Melle : la Figure 148 montre clairement que les monnaies de cet atelier sont celles du Type 2 de Charlemagne qui contiennent le moins d'or. Cette tendance observée pour les concentrations en or semble corrélée aux teneurs en zinc. La représentation

---

<sup>507</sup> Voir *supra* p. 361.

graphique de ces deux éléments met en évidence que les pièces de Melle forment un groupe qui se distingue des autres émissions contemporaines.

L'étude des teneurs de ces deux éléments pour les monnaies melloises des types monétaires ultérieurs nous indiquera si cette tendance se poursuit.



**Figure 148** - Diagramme binaire représentant les teneurs en or en fonction des teneurs en zinc pour les monnaies du Type 2 de Charlemagne (771-793/4).  
Echelle logarithmique en abscisse et en ordonnée.

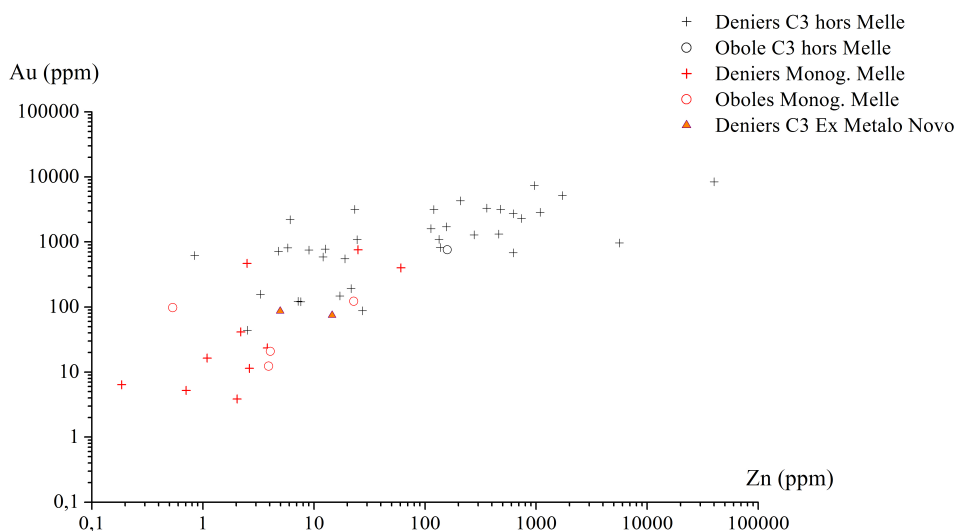
#### (ii) - Charlemagne Type 3 (793/4-812)

Les monnaies du Type 3 de Charlemagne sont indiscernables de celles de Charles le Chauve au monogramme carolin, à l'exception de celles qui portent dans leur légende du revers une croix caractéristique<sup>508</sup>. Ces dernières monnaies n'ont pas été considérées ici ; seules ont été prises en compte les pièces de Melle au monogramme carolin de période d'émission incertaine.

Bien que les monnaies présentées puissent être datées de deux périodes d'émission différentes, celles de Melle au monogramme carolin forment un groupe relativement homogène sur la Figure 149. Les tendances observées pour le Type 2 de Charlemagne pour l'or et le zinc semblent se poursuivre : les monnaies de Melle au monogramme carolin présentent d'une manière générale des teneurs plus faibles que les pièces du Type 3 de Charlemagne provenant d'autres ateliers. Il semble donc que la spécificité melloise observée pour les émissions antérieures à la réforme de 793/4 se poursuive après, si l'on considère que certaines parmi les

<sup>508</sup> Voir *supra* p. 279.

monnaies de Melle au monogramme carolin de période d'émission incertaine datent bien du règne de Charlemagne.



**Figure 149** - Diagramme binaire représentant les teneurs en or en fonction des teneurs en zinc pour les monnaies de Melle au monogramme carolin de période d'émission indéterminée et du Type 3 de Charlemagne (771-793/4) des autres ateliers. Echelle logarithmique en abscisse et en ordonnée.

Les teneurs en or et en zinc des deniers au monogramme du Type 3 de Charlemagne et portant la légende EX METALLO NOVO sont plutôt faibles et semblent les rapprocher du groupe des monnaies de Melle (Figure 149). L'attribution des deniers de ce type à cet atelier n'est donc au moins pas exclue d'après ces résultats. L'étude des éléments-traces semble confirmer la similarité avec les pièces au nom de Melle qui était ressortie des analyses des rapports isotopiques du plomb effectuées par le passé<sup>509</sup>.

### (iii) - Charlemagne Type 4 (812-814)

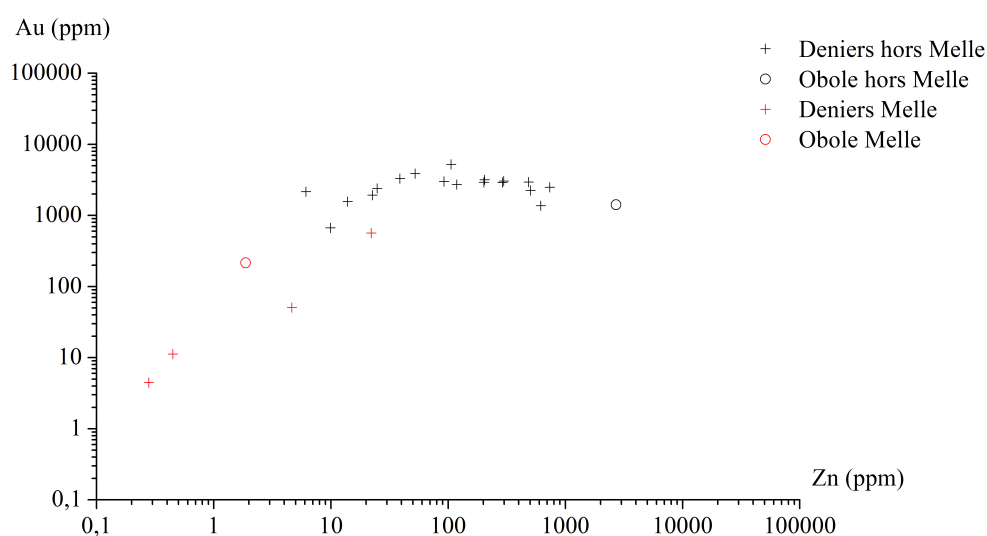
Un des deniers au buste du Type 4 de Charlemagne à la légende METALL GERMAN au revers pourrait être issu de l'atelier de Melle (Prou 972). Sa teneur en or est relativement élevée en comparaison avec les monnaies au nom de Melle des autres périodes d'émission (1860 ppm). Il ne s'agit toutefois pas d'un critère absolu qui permette d'écarter l'attribution des deniers du Type METALL GERMAN à l'atelier de Melle.

<sup>509</sup> (Téreygeol *et al.*, 2005) p. 54.



(iv) - Louis le Pieux Type 1 (814-818)

La tendance observée pour Charlemagne pour l'or et le zinc dans les monnaies de Melle semble se poursuivre pour les deniers au buste du Type 1 de Louis le Pieux (Figure 150). Les points correspondant aux exemplaires mellois forment un groupe distinct des autres échantillons, qui contiennent davantage de ces deux éléments discriminants. Bien que la tendance semble marquée, le faible nombre d'exemplaires de ce type analysés incite à effectuer des analyses complémentaires pour confirmer que la tendance qui s'était dessinée pour Charlemagne se poursuit après 814.



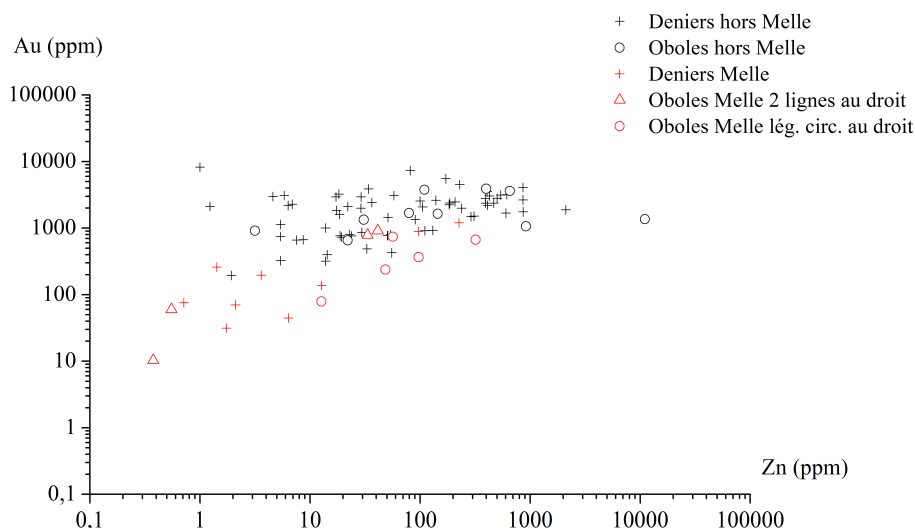
**Figure 150** - Diagramme binaire représentant les teneurs en or en fonction des teneurs en zinc pour les monnaies du Type 1 de Louis le Pieux (814-818).  
Echelle logarithmique en abscisse et en ordonnée.

(v) - Louis le Pieux Type 2 (818-822/3)

Les teneurs en or et en zinc dans les monnaies du Type 2 de Louis le Pieux de Melle et des autres ateliers monétaires sont comparées sur la Figure 151. La plupart des échantillons mellois présentent des teneurs faibles pour les deux éléments discriminants, mais il semble que les groupes formés par les monnaies de Melle et celles des autres ateliers convergent, et se mélangent davantage que pour les périodes précédentes.

Si la tendance observée reflète la réalité de l'ensemble des monnaies du Type 2 de Louis le Pieux en circulation, cela pourrait signifier que les refontes successives lors des changements de type monétaire pourraient avoir « dilué » la signature chimique de l'argent extrait des mines de Melle.

Les variantes dans la disposition des légendes de droit et de revers des oboles de Melle ne semblent pas être corrélées avec des particularités de teneurs en éléments mineurs et traces en général, et en or et en zinc en particulier (Figure 151).

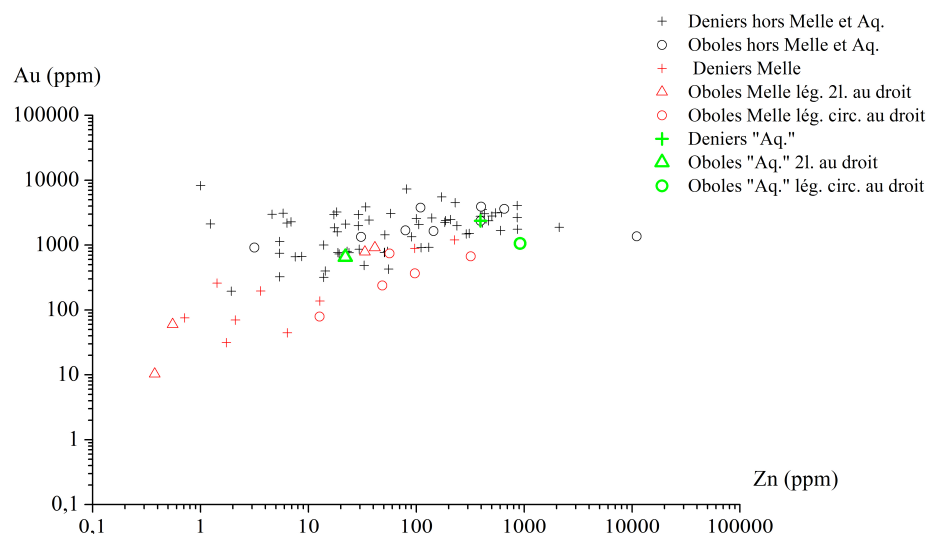


**Figure 151** - Diagramme binaire représentant les teneurs en or en fonction des teneurs en zinc pour les monnaies du Type 2 de Louis le Pieux (818-822/3). Echelle logarithmique en abscisse et en ordonnée.

L'hypothèse d'une frappe à Melle des oboles du Type 2 de Louis le Pieux au nom d'Aquitaine a été proposée par Coupland, sur la base de l'existence des mêmes variétés pour les exemplaires qui portent ces deux noms<sup>510</sup>. Une tendance générale des monnaies de Melle à contenir moins d'or et de zinc que les autres exemplaires pourrait se retrouver pour les pièces au nom d'Aquitaine, si celles-ci contiennent effectivement de l'argent essentiellement mellois.

La Figure 152 présente la comparaison des teneurs en or et en zinc des monnaies du Type 2 de Louis le Pieux au nom d'Aquitaine, avec celles des exemplaires contemporains de Melle et des autres ateliers carolingiens. Le denier à la légende en deux lignes au revers, l'obole de la même variété, ainsi que celle à la légende bi-linéaire au droit, y sont différenciés pour être comparés avec les exemplaires similaires de Melle.

<sup>510</sup> Voir (Coupland, 1990) p. 33 n. 35 et *supra* p. 234.



**Figure 152** - Diagramme binaire représentant les teneurs en or en fonction des teneurs en zinc pour les monnaies du Type 2 de Louis le Pieux (818-822/3). Comparaison des deniers et oboles au nom d'Aquitaine avec les exemplaires de Melle d'une part et des autres ateliers d'autre part. Echelle logarithmique en abscisse et en ordonnée.

Le denier Prou 657 au nom d'Aquitaine suit le type le plus répandu pour les monnaies du Type 2 de Louis le Pieux, avec le nom du lieu d'émission dans le champ au revers. Ses teneurs en or et en zinc sont relativement élevées et le différentiel de la majorité des exemplaires au nom de Melle, pour lesquels ces deux éléments sont peu abondants (Figure 152). L'attribution de cette monnaie à l'atelier de Melle n'est donc pas confirmée par ce résultat. Les seules teneurs en or et en zinc ne permettent pas de l'exclure.

L'obole d'Aquitaine du Type 2 de Louis le Pieux Prou 658 présente une légende circulaire au droit et bi-linéaire au revers, comme c'est le cas pour la majorité des deniers de la même période. Ses teneurs en or et en zinc sont relativement élevées par rapport aux monnaies de Melle en général. On observe toutefois que le point correspondant à Prou 658 sur la Figure 152 s'aligne avec les oboles de Melle du même sous-type à la légende circulaire au droit. L'interprétation de cette remarque est délicate ; des mélanges de stocks d'argent d'origines différentes pourraient être à l'origine du phénomène observé. L'hypothèse d'une frappe à Melle ou avec de l'argent mellois pour cet exemplaire ne peut être confirmée ni être exclue par ce résultat.

La seconde obole d'Aquitaine Prou 655 présente une légende bi-linéaire au droit, et circulaire au revers. Cet exemplaire s'inscrit dans le groupe formé par les monnaies de Melle de la même période du point de vue des teneurs en or et en zinc. Les quatre oboles authentiques du Type 2 de Louis le Pieux analysées dont la disposition des légendes est identique à Prou 655 se séparent en deux groupes

distincts : d'une part Prou 709 et Prou 710, qui présentent des teneurs en or et en zinc extrêmement faibles ; d'autre part, Prou 711 et BnF 1982-64 dont les concentrations pour ces deux éléments sont plus élevées, et les inscrivent dans la zone de recouvrement entre les monnaies de Melle et celles d'autres ateliers (Figure 152). C'est de ces deux derniers exemplaires que l'obole d'Aquitaine tend à se rapprocher d'après ses teneurs en or et en zinc. Il ne s'agit toutefois pas d'un critère absolu de différenciation des pièces de Melle, d'autant plus que les deux groupes formés par les exemplaires mellois et les autres pour les types précédents tendent à se rapprocher pour le Type 2 de Louis le Pieux.

Ces résultats sont insuffisants pour exclure ou confirmer une origine melloise des monnaies du Type 2 de Louis le Pieux au nom d'Aquitaine. La tendance observée pour ce type monétaire par rapport aux précédents semble être un rapprochement des groupes formés par les pièces de Melle d'une part, et celles des autres ateliers de frappe d'autre part. Des mélanges de stocks d'argent mellois et extérieurs pourraient être à l'origine de cette évolution.

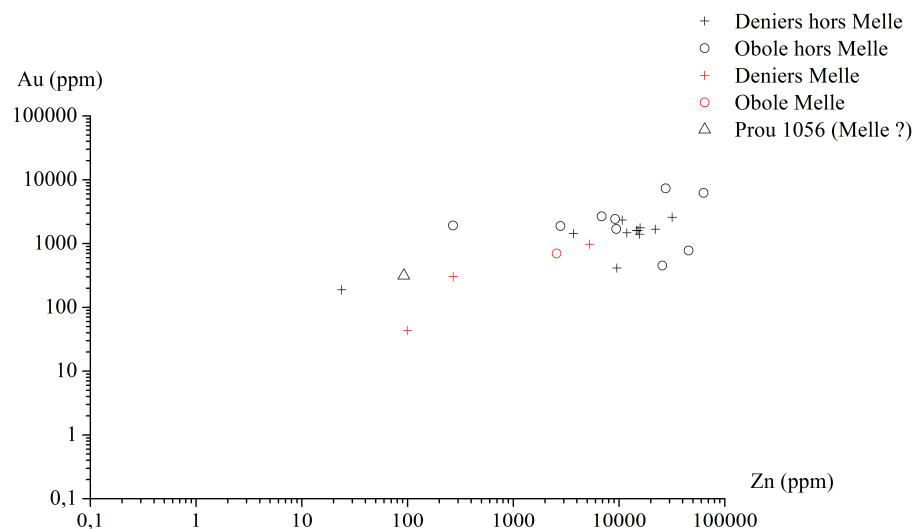
La comparaison entre les rapports isotopiques du plomb caractérisant les monnaies aux noms de Melle et d'Aquitaine serait probablement un meilleur indice que la seule signature en éléments-traces. Peut-être cette approche pourrait-elle permettre de confirmer la différence observée entre les deux deniers et l'obole d'Aquitaine du Type 2 de Louis le Pieux qui ressort de l'examen des teneurs en or et en zinc.

#### (vi) - Pépin II d'Aquitaine (839-852)

Aucune des monnaies melloises de Pépin II d'Aquitaine ne présente de teneurs en or et en zinc particulièrement faibles (Figure 153), comme cela a été observé pour les types antérieurs. Deux des deniers de Melle analysés, ainsi que l'exemplaire Prou 1056 qui pourrait être issu de cet atelier<sup>511</sup>, contiennent relativement peu de ces deux éléments en comparaison avec les pièces contemporaines des autres ateliers, tandis que le troisième denier et l'obole de cet atelier se rapprochent des autres échantillons de ce point de vue.

---

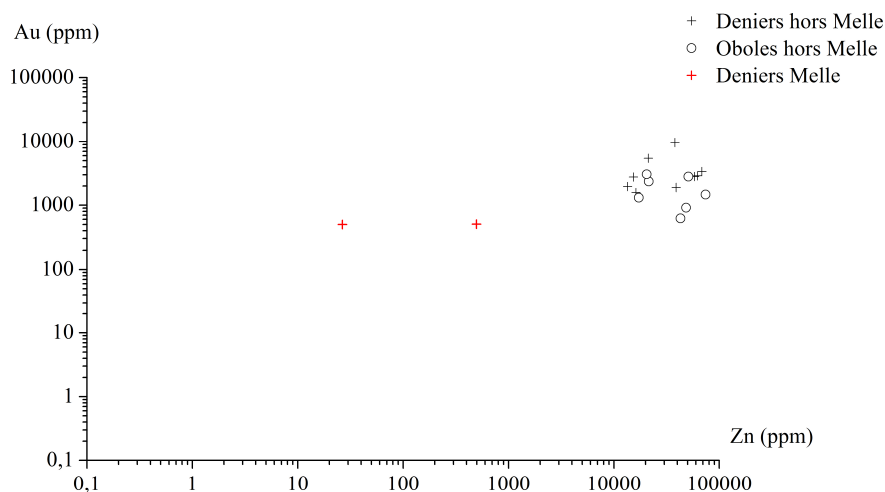
<sup>511</sup> Voir (Coupland, 1989) p. 207-208.



**Figure 153** - Diagramme binaire représentant les teneurs en or en fonction des teneurs en zinc pour les monnaies de Pépin II d'Aquitaine. Echelle logarithmique en abscisse et en ordonnée.

(vii) - Charles le Chauve Première période (840-864)

Les monnaies de Melle de la Première période d'émission de Charles le Chauve se différencient nettement des autres frappes des mêmes années si l'on considère les teneurs en or et en zinc (Figure 154).



**Figure 154** - Diagramme binaire représentant les teneurs en or en fonction des teneurs en zinc pour les monnaies de la Première période d'émission de Charles le Chauve (840-864). Echelle logarithmique en abscisse et en ordonnée.

Les concentrations en or dans les deux deniers de Melle de Charles le Chauve à la légende en deux lignes considérés (Prou 726 et Prou 727) sont les deux plus basses pour l'ensemble des monnaies datées des années 840-864. C'est

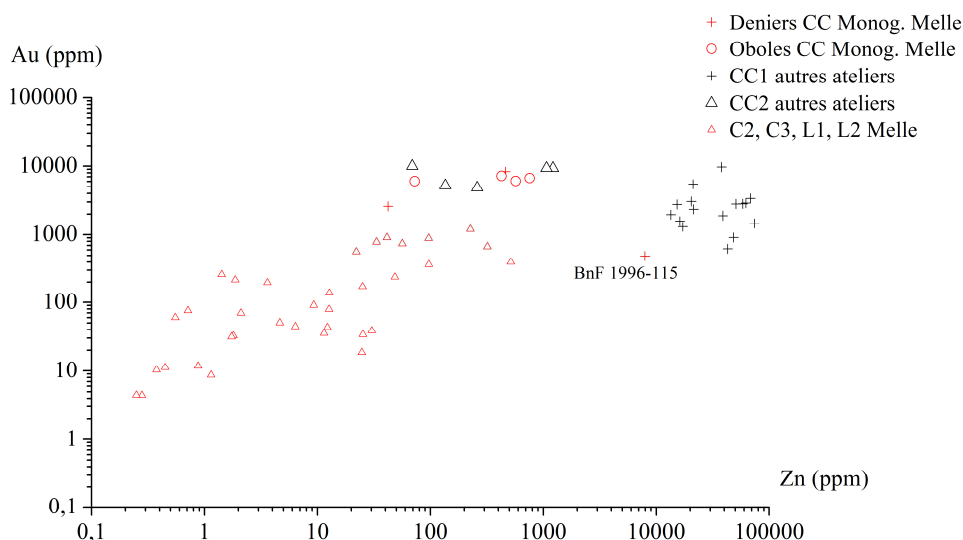
toutefois le zinc qui est le principal élément discriminant pour cette période : les teneurs de cet élément dans les pièces issues d'autres ateliers que celui de Melle montrent la présence de laiton allié à l'argent, et non de cuivre comme cela semble être le cas pour les deux exemplaires de Melle.

Les oboles au nom d'Aquitaine sont, du point de vue des teneurs en or et en zinc, plus proches de celles des autres ateliers considérés (Paris, Tours, Quentovic et Bourges) que de celles de Melle, comme cela avait été remarqué plus haut concernant leur titre. Cela pourrait suggérer que ce n'est pas l'atelier de Melle qui est émetteur de ces pièces. La question du lieu d'émission des pièces au nom d'Aquitaine reste donc ouverte.

(viii) - Les monnaies au monogramme carolin  
de Charles le Chauve (840-877)

Les monnaies de Melle au monogramme carolin sur lesquelles apparaît une croix caractéristique, dans la légende du revers pour les deniers et auprès du monogramme au droit pour les oboles, sont associées au règne de Charles le Chauve uniquement. Leur présence dans des trésors des années 840, aussi bien que dans des trouvailles du début du X<sup>e</sup> siècle comme celle de Cuerdale, date leur frappe de l'ensemble du règne de Charles le Chauve entre 840 et 877, voire d'années plus tardives encore. C'est donc à l'ensemble des exemplaires des autres ateliers monétaires du souverain de Francie Occidentale, antérieurs et postérieurs à l'édit de Pîtres de 864, qu'il convient de comparer les pièces de Melle au monogramme carolin et à la croix caractéristique du point de vue des teneurs en or et en zinc (Figure 155).

La Figure 155 met en évidence le rapprochement des monnaies de Melle au monogramme carolin et à la croix caractéristique avec les pièces de la Deuxième période d'émission de Charles le Chauve. La différenciation avec les exemplaires de ce souverain antérieurs à l'édit de Pîtres est en revanche bien visible : les teneurs en zinc extrêmement élevées contenues dans ces alliages monétaires, qui traduisent l'ajout de laiton à l'argent, caractérisent en effet les années de la Première période d'émission en Francie Occidentale, mais ne semblent pas se prolonger après 864.



**Figure 155** - Diagramme binaire représentant les teneurs en or en fonction des teneurs en zinc pour les monnaies de Melle au monogramme carolin attribuées à Charles le Chauve, ainsi que pour les exemplaires de la Première et de la Deuxième périodes de Charles le Chauve, et ceux de Melle de Charlemagne et Louis le Pieux. Echelle logarithmique en abscisse et en ordonnée.

Du point de vue des teneurs en zinc donc, les monnaies de Melle au monogramme carolin et à la croix caractéristique tendent à se rapprocher de la Deuxième période d'émission de Charles le Chauve, plutôt que de la Première. Il est possible que tous les exemplaires mellois de notre *corpus* au monogramme carolin et à la croix caractéristique soient datés d'années postérieures à 864, et qu'aucun n'ait été frappé entre 840 et 864. Seule l'analyse de pièces issues de trésors qui peuvent être rapprochés d'une période précise permettrait de confirmer une éventuelle différenciation des alliages monétaires des deux périodes d'émission de Charles le Chauve à partir des teneurs en or et en zinc.

BnF 1996-115 est le seul exemplaire parmi les monnaies de Melle au monogramme carolin et attribuées à Charles le Chauve dont les teneurs en or et en zinc tendent à le rapprocher des émissions de la Première période de Charles le Chauve (840-864). Le titre très faible de ce denier le différencie déjà des autres exemplaires de Melle au monogramme carolin. Les teneurs en éléments-traces semblent donc confirmer que cet exemplaire est le seul au sein de notre *corpus* de monnaies melloises au monogramme carolin à attribuer aux années 840-864.

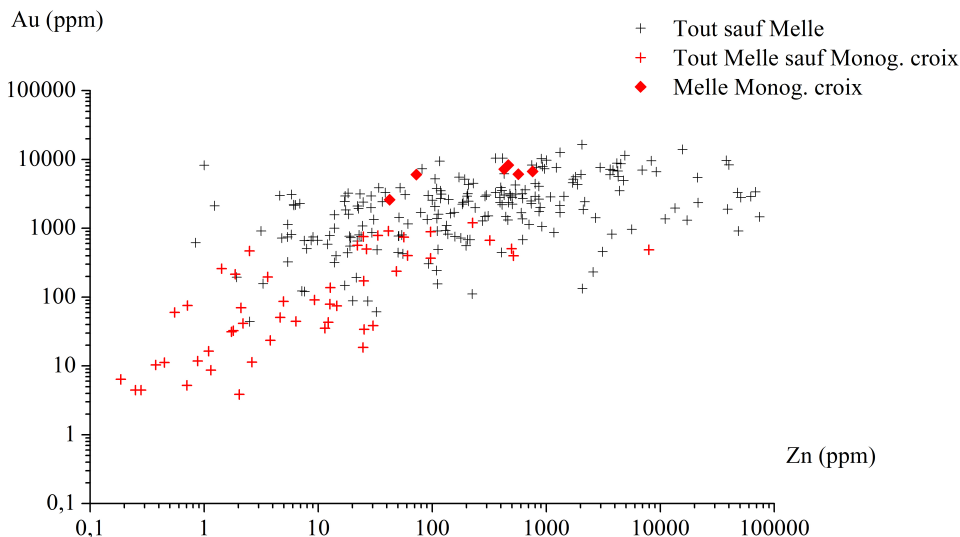
Les teneurs en or, et surtout en zinc, dans les monnaies de Melle à la croix caractéristique, sont relativement plus élevées que celles qui caractérisaient les émissions de Charlemagne et de Louis le Pieux de cet atelier (Figure 155). Si les teneurs en or et en zinc particulièrement basses constituent une « signature » de l'argent de Melle pur, le déplacement vers des valeurs plus élevées pour les

monnaies de Melle au monogramme carolin et à la croix caractéristique pourrait être le reflet d'un mélange d'argent mellois avec du métal ou des monnaies de l'extérieur.

(ix) - Interprétation des spécificités melloises du point de vue des teneurs en or et en zinc

Les monnaies melloises de Charlemagne et Louis le Pieux semblent montrer une réelle spécificité de composition du point de vue des teneurs en or et en zinc. Les teneurs de ces deux éléments sous Charlemagne et Louis le Pieux sont plus faibles pour Melle que pour les autres ateliers. Durant la Première période d'émission de monnaies de Charles le Chauve, c'est l'alliage de cuivre et non de laiton dans les exemplaires mellois qui les différencie des autres. Pour les pièces de Melle au monogramme carolin et à la croix caractéristique, la comparaison avec les deniers frappés au type de l'édit de Pîtres supposés contemporains montre une homogénéité entre émissions melloises et non melloises.

Les résultats présentés montrent une spécificité réelle des monnaies de Melle concernant la faiblesse de leurs teneurs en or et en zinc. La Figure 156, sur laquelle apparaît l'ensemble des échantillons analysés, convaincra les plus sceptiques. Seules les monnaies au monogramme carolin à la croix caractéristique datées du règne de Charles le Chauve, dont les teneurs en or sont supérieures à 1000 ppm, se distinguent véritablement des autres exemplaires de Melle sur cette figure.



**Figure 156** - Diagramme binaire représentant les teneurs en or en fonction des teneurs en zinc pour l'ensemble des monnaies carolingiennes analysées depuis 771 jusqu'à après 864. Les monnaies de Melle sont dissociées des autres, et parmi elles celles au monogramme carolin et à la croix caractéristique sont différenciées. Echelle logarithmique en abscisse et en ordonnée.



Le lien de l'atelier monétaire de Melle avec la principale mine d'argent carolingienne fait penser à une particularité du minerai qui en est extrait. L'argent frappé au sein de l'atelier monétaire de Melle provient des mines qui y sont associées : la localisation d'un des ateliers de frappe les plus importants de la période carolingienne, loin de toute ville d'importance, s'explique par la présence d'un grand centre d'extraction d'argent ; les analyses des rapports isotopiques du plomb le confirment<sup>512</sup>. Il ne s'agit certes pas d'un critère suffisant pour identifier la présence de ce métal dans les monnaies issues des autres ateliers, mais de faibles teneurs en or et en zinc semblent caractériser l'argent extrait de Melle.

Les teneurs en or et en zinc dans les monnaies de Melle et dans celles des autres ateliers semblent se rapprocher progressivement durant la période étudiée. Pour les émissions les plus tardives, vraisemblablement postérieures à 864, les teneurs en or et en zinc des monnaies de Melle au monogramme carolin et à la croix caractéristique sont largement déplacées vers des valeurs plus élevées. Cela nous amène à l'interprétation d'un éventuel sens historique de la présence d'une croix sur certaines des monnaies au monogramme carolin de Charles le Chauve. Cela signifierait-il que ces pièces auraient été frappées à Melle avec de l'argent extérieur ? Ou bien s'agit-il d'une marque destinée à identifier les exemplaires faits d'argent issu par exemple d'une veine récemment exploitée ? Les données analytiques, historiques et numismatiques, sont trop minces pour pousser plus avant l'interprétation de ces questions.

Des analyses des rapports isotopiques du plomb de certaines pièces melloises ont été entreprises pour étudier de ce point de vue les différences ressorties de l'étude des éléments mineurs et traces.

#### ***d. Les analyses des rapports isotopiques du plomb***

Le plomb présente naturellement plusieurs isotopes de masses 204, 206, 207 et 208. Les trois derniers sont les produits des chaînes de désintégration radioactives de l'uranium et du thorium. Leur abondance relative varie dans chaque roche, et donc la caractérise.

La connaissance des rapports d'abondance entre les différents isotopes du plomb peut permettre, dans le cas de l'analyse de l'argent, de rapprocher des échantillons d'une source de minerai, ou au contraire d'exclure une hypothèse de provenance du métal utilisé. Il ne s'agit pas d'une méthode absolue : des gisements différents peuvent en effet avoir des signatures proches ; des mélanges de stocks

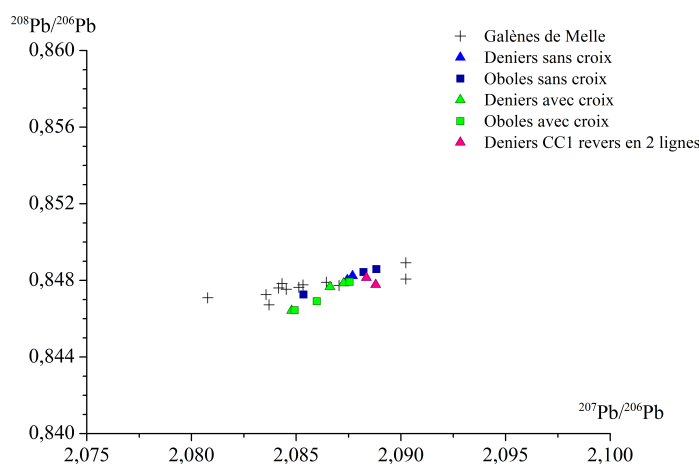
---

<sup>512</sup> (Téreygeol *et al.*, 2005) p. 53-54 et (Barrandon et Dumas, 1990) p. 904 et 906.

d'argent de deux origines distinctes peuvent également conférer à l'ensemble une signature identique à celle d'un gisement extérieur.

D'une manière générale, les regroupements d'échantillons sur des diagrammes représentant des rapports entre des isotopes du plomb ne peuvent être interprétés comme la preuve irréfutable que leur origine est identique ; en revanche, la différenciation des points correspondants sur une représentation graphique exclut l'hypothèse d'une même source de métal.

Les résultats de quelques analyses des rapports isotopiques du plomb sur des monnaies de Melle permettent d'avancer davantage dans la compréhension des problématiques liées aux teneurs en éléments-traces des exemplaires de notre *corpus*<sup>513</sup>. Des deniers et oboles avec et sans croix caractéristique, ainsi que les deux deniers de la Première période d'émission de Charles le Chauve à la légende en deux lignes au revers, ont été étudiés selon cette approche. Les résultats obtenus apparaissent dans l'Annexe 5 et sont présentés graphiquement sur la Figure 157.



**Figure 157** - Représentation graphique des rapports isotopiques du plomb dans les monnaies de Melle au monogramme carolin avec ou sans croix caractéristique, et dans les deniers de Melle de la Première période d'émission de Charles le Chauve à la légende en deux lignes au revers. Les caractéristiques de galènes de la mine de Melle sont reportées d'après (Téreygeol *et al.*, 2005).

La comparaison des caractéristiques isotopiques du plomb des monnaies de notre *corpus* sur la Figure 157 montre une similarité de la signature de l'ensemble des échantillons. Les points correspondant aux deniers et aux oboles, avec ou sans croix caractéristique, se regroupent dans une même zone. Il en est de même pour

<sup>513</sup> Les analyses des rapports isotopiques du plomb présentées dans cette thèse ont été réalisées à notre demande par C. Guerrot du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) d'Orléans par *Thermal ionization mass spectrometry* (TIMS), selon la méthode décrite dans (Pomiès *et al.*, 1998). Sur l'utilisation des rapports isotopiques du plomb pour les études de provenance en numismatique voir (Stos-Gale, 1998).

les deniers de la Première période d'émission de Charles le Chauve à la légende en deux lignes au revers. Les caractéristiques isotopiques du plomb de tous les échantillons analysés les placent dans le domaine graphique défini par les galènes extraites des mines de Melle caractérisées par Téreygeol *et al.*<sup>514</sup>. Il est donc probable que l'argent constituant l'ensemble des monnaies de notre *corpus* dont les rapports entre les différents isotopes du plomb ont été déterminés provienne du gisement minier de Melle.

Les différences numismatiques entre certaines des monnaies de Melle au monogramme carolin, corrélées à l'étude des teneurs en or et en zinc, ne se retrouvent donc pas dans les signatures isotopiques. Les pièces au monogramme carolin au nom de cet atelier, qu'elles portent ou non une croix caractéristique, ont très vraisemblablement été fabriquées avec de l'argent local. Comment expliquer alors la corrélation entre les variétés numismatiques et les différences de teneurs en éléments-traces, qui, de plus, semblent correspondre à une évolution chronologique ? Peut-être les procédés minéralurgiques ou métallurgiques ont-ils évolué durant cette période. Le mélange d'argent mellois avec du métal extérieur, dont la signature isotopique serait proche, mais dont la teneur en zinc serait nettement plus élevée que celle qui caractérise l'argent de Melle, pourrait avoir conduit à une modification de la signature en éléments-traces des monnaies au nom de Melle, sans pour autant que la signature isotopique du plomb évolue.

### **3. Les monnaies au monogramme carolin de période d'attribution incertaine**

Les monnaies au monogramme carolin de Melle peuvent être attribuées à la période du règne de Charlemagne comprise entre 793/4 et 812, et à Charles le Chauve à partir de 840 et peut-être encore après sa mort en 877. Des variétés existent parmi ces pièces ; celles-ci sont toutefois insuffisantes pour attribuer chaque exemplaire à l'une des deux périodes d'émission.

La présence d'une croix, dans la légende circulaire au revers des deniers, et à côté du monogramme carolin pour les oboles, permet d'attribuer les monnaies qui présentent ces caractéristiques à Charles le Chauve et non à Charlemagne. Celles qui ne présentent pas cette particularité peuvent avoir été frappées durant les années de règne de l'un ou l'autre de ces souverains.

Peut-être la composition des alliages constituant ces monnaies peut-elle permettre de différencier les exemplaires au monogramme carolin de Melle de

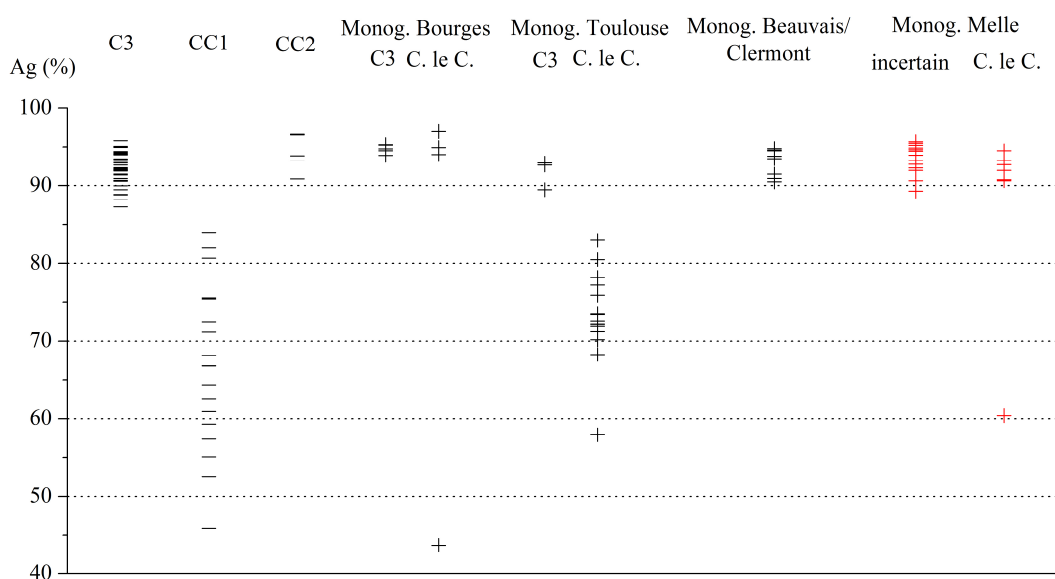
---

<sup>514</sup> Les valeurs reprises apparaissent dans (Téreygeol *et al.*, 2005) p. 50 Figure 1.

Charlemagne et de Charles le Chauve. Le titre d'argent a d'abord été examiné, puis les teneurs en éléments mineurs et traces.

### a. Le titre d'argent

Les monnaies de Melle et au monogramme carolin de période d'émission indéterminée présentent, deniers comme oboles, et quelles qu'en soient les variétés, des titres élevés et regroupés (Figure 158). La moyenne de titre pour ces pièces est de 93,9 %.



**Figure 158** - Représentation graphique du titre d'argent des deniers au monogramme carolin de Melle, et comparaison avec les monnaies du Type 3 de Charlemagne et des Première et Deuxième périodes d'émission de Charles le Chauve. Mise en évidence des monnaies au monogramme de Bourges, Toulouse, Beauvais et Clermont.

Le titre des monnaies de Melle de période d'émission incertaine est comparé sur la Figure 158 avec celui des pièces du Type 3 de Charlemagne, de la Première période et de la Deuxième période d'émission de Charles le Chauve. Les monnaies au monogramme carolin de Bourges et de Toulouse attribuées à Charlemagne et à Charles le Chauve, ainsi que celles de Beauvais et Clermont de la Deuxième période d'émission de Charles le Chauve, apparaissent également.

Les valeurs de titres des deniers au monogramme carolin de Melle et de Bourges les rapprochent des émissions du Type 3 de Charlemagne et de la Deuxième période de Charles le Chauve, après 864 (Figure 158). Pour les monnaies attribuées à ces types comme pour celles qui sont incertaines, les titres moyens sont de l'ordre de 92 % à 95 % d'argent.

Bien que des monnaies au monogramme de Melle aient été frappées durant la Première période d'émission de Charles le Chauve (840-864), les titres de la quasi-totalité des exemplaires analysés les distinguent de celles des autres ateliers datées avec certitude de cette période : les monnaies incertaines au monogramme carolin contiennent entre 90 % et 95 % d'argent environ, tandis que les titres des pièces des autres ateliers datées avec certitude de la période 840-864 sont compris entre 40 % et 85 %.

Il semble donc qu'aucune des monnaies au monogramme carolin de période d'émission incertaine ne soit datée des années 840-864 qui correspondent à la Première période d'émission de Charles le Chauve, et qui sont caractérisées par des titres d'argent faibles et très dispersées. Les exemplaires de notre *corpus* semblent en revanche correspondre au standard de titre du Type 3 de Charlemagne (793/4-812) et de la Deuxième période d'émission de Charles le Chauve (864-877).

Le titre d'argent n'est toutefois pas un critère qui permet de différencier certaines des monnaies de période d'attribution indéterminée. Ce n'est donc pas cette information qui peut distinguer les monnaies au monogramme carolin de Charlemagne et de Charles le Chauve au nom de Melle. C'est pourquoi des analyses complémentaires de deniers de Melle au monogramme carolin sont nécessaires. Elles devront porter cette fois non pas sur des exemplaires de collection mais sur des pièces issues de trouvailles datées précisément. Cette approche serait la plus adaptée pour confirmer ou infirmer les hypothèses proposées plus haut, et peut-être contribuer à mieux comprendre les émissions de monnaies au monogramme carolin en Aquitaine.

#### ***b. Les éléments mineurs et traces***

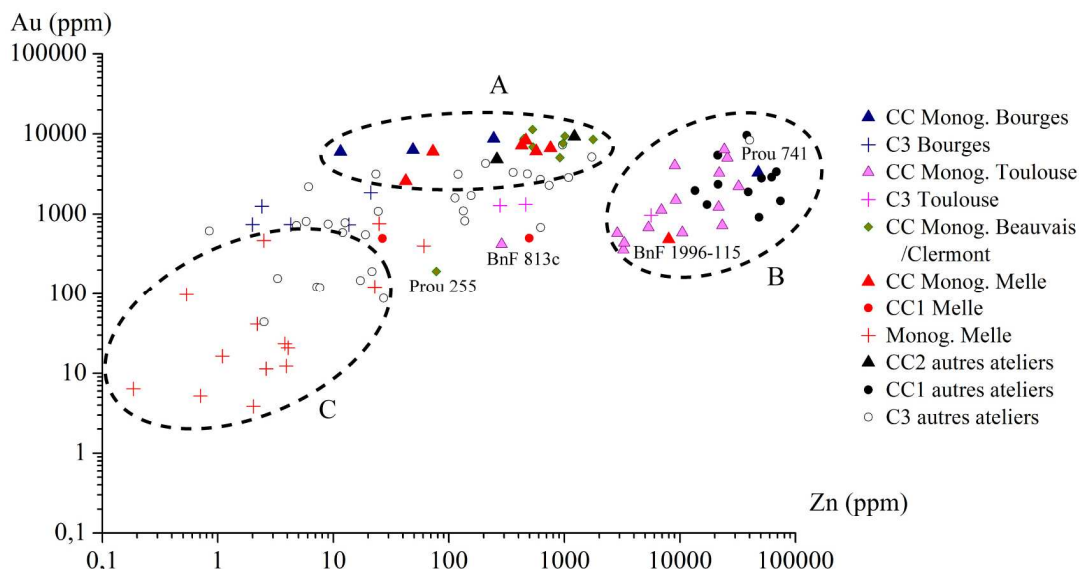
Les analyses des rapports isotopiques du plomb effectuées par le passé ont montré que la signature des pièces carolingiennes au nom de Bourges est similaire à celle des mines et des monnaies de Melle<sup>515</sup>. L'or et le zinc, dont les teneurs sont apparues relativement basses pour les deniers et oboles mellois, ont donc été examinés ici pour les exemplaires de Bourges également.

La Figure 159 représente les teneurs en or en fonction des teneurs en zinc pour les monnaies de Melle au monogramme carolin qui ne peuvent être attribuées à Charlemagne ou à Charles le Chauve sur la seule base de l'étude numismatique. Les teneurs de ces deux éléments caractéristiques sont également représentées sur ce graphique pour les groupes de monnaies suivants : les pièces au monogramme carolin du Type 3 de Charlemagne (793/4-812) ; les exemplaires de Charles le Chauve de la Première période (840-864) et de la Deuxième période (864-877). Les

---

<sup>515</sup> (Barrandon et Dumas, 1990) p. 906 et Figure 3 p. 905.

points correspondants aux monnaies au monogramme carolin de Charlemagne et de Charles le Chauve de Bourges et de Toulouse, ainsi que celles de Beauvais et Clermont du plus tardif de ces deux souverains, apparaissent également.



**Figure 159** - Diagramme binaire représentant les teneurs en or en fonction des teneurs en zinc pour les monnaies au monogramme carolin de Melle incertaines et de Charles le Chauve, du Type 3 de Charlemagne et des Première et Deuxième périodes d'émission de Charles le Chauve. Echelle logarithmique en abscisse et en ordonnée.

Les teneurs en or et en zinc des monnaies de Melle de période d'émission incertaine sont relativement faible en comparaison avec les celles qui caractérisent les pièces issues d'autres ateliers du Type 3 de Charlemagne, et encore davantage de la Première et de la Deuxième période d'émission de Charles le Chauve. Les points correspondant à ces pièces dont le souverain émetteur est inconnu se regroupent dans l'ellipse C sur la Figure 159. Ces points sont nettement distincts de ceux des exemplaires mellois au monogramme que l'étude numismatique rapproche du règne de Charles le Chauve, qui sont quant à eux contenus dans l'ellipse A, et qui contiennent davantage d'or et de zinc. L'ellipse C formée par les points correspondant aux monnaies melloises de souverain émetteur indéterminé se superpose avec celle qui caractérise les émissions de ce même atelier pour le Type 2 de Charlemagne et pour les Types 1 et 2 de Louis le Pieux (Figure 148 p. 389, Figure 150 p. 391 et Figure 151 p. 392). L'ensemble de ces éléments semble donc montrer que les monnaies de Melle au monogramme carolin de période d'émission incertaine doivent être rapprochées de celles du Type 3 de Charlemagne, et donc des années 793/4-812.

Bien que ces critères ne peuvent être considérés comme absolus, la combinaison de l'étude du titre d'argent et des teneurs en éléments-traces

caractéristiques semble permettre de rapprocher les monnaies melloises incertaines d'une période d'émission précise entre celle du Type 3 de Charlemagne, et la Première et la Deuxième période de Charles le Chauve (840-864 et 864-877). L'analyse de pièces issues de trésors datés de chacune de ces périodes permettrait de confirmer que le couplage de l'étude des teneurs en éléments majeurs et en éléments-traces permet de dater plus précisément les monnaies de Melle pour lesquelles l'étude numismatique seule est insuffisante.

La seule monnaie melloise au monogramme de période d'émission incertaine qui se différencie des autres est BnF 1996-115, dont le titre faible avait suggéré une attribution à la Première période de Charles le Chauve. L'examen des teneurs en or et en zinc, ainsi que leur représentation graphique sur la Figure 159, confirme cette hypothèse : les concentrations de ces deux éléments caractéristiques pour BnF 1996-115 le rapprochent en effet du groupe formé par les pièces datées des années 840-864, qui forment l'ellipse B. Leurs teneurs en zinc très élevées liées à l'ajout de laiton expliquent leur regroupement. La cohérence de la composition de BnF 1996-115 avec celle des monnaies datées de la Première période d'émission est de plus en bon accord avec la présence de tels exemplaires dans les trésors : la seule monnaie melloise recensée dans la littérature dont la titulature au droit est CARLVSREX, comme c'est le cas pour BnF 1996-115, est issue du trésor de Brioux, dont la composition suggère un enfouissement autour de 848, et donc antérieur à 864.

La présence au sein du groupe constitué par l'ellipse B sur la Figure 159 des points correspondant aux monnaies au monogramme carolin de Toulouse attribuables à Charles le Chauve confirme leur attribution à la Première période d'émission de Charles le Chauve qui avait été proposée sur la seule base de l'étude du titre d'argent<sup>516</sup>.

De même, les teneurs en or et en zinc des monnaies au monogramme de Melle et Bourges attribuées à Charles le Chauve, et de Beauvais et Clermont, sont proches de celles qui caractérisent les pièces du Type GDR analysées<sup>517</sup>. Ces exemplaires semblent donc avoir été frappés après 864, comme l'étude du titre d'argent l'avait suggéré, et comme la composition des trésors en atteste pour les exemplaires de Beauvais et de Clermont.

---

<sup>516</sup> A l'exception du denier BnF 813c mis en évidence sur la Figure 159.

<sup>517</sup> A l'exception du denier de Beauvais Prou 255 mis en évidence sur la Figure 159.

#### 4. Les *emporía* du Nord : Dorestad et Quentovic

Les résultats analytiques obtenus pour les monnaies issues des ateliers de Dorestad et Quentovic ont été étudiés spécifiquement. Les relations commerciales de ces deux comptoirs commerciaux avec la Scandinavie et l'Angleterre constituent des ouvertures importantes du monde franc sur l'extérieur. La question de l'origine de l'argent carolingien, qui n'a à ce jour pas trouvé de réponse pleinement satisfaisante, se trouve ici soulevée à nouveau. Il est envisageable que le commerce à longue distance depuis ces deux comptoirs ait amené de l'argent d'une origine extérieure au territoire carolingien. Peut-être la présence d'un élément-trace caractéristique d'un stock de métal précieux incorporé à la masse monétaire carolingienne depuis l'atelier monétaire de Dorestad ou de celui de Quentovic, pourrait en être un témoin décelable grâce aux moyens analytiques mis en œuvre dans le cadre de cette thèse.

Selon Hodges et Whitehouse, les années durant lesquelles les échanges commerciaux depuis les ports de Dorestad et de Quentovic auraient été les plus intenses sont vers 780-820 pour le premier, et 790-830 pour le second<sup>518</sup>. Les règnes de Charlemagne et de Louis le Pieux, au moins pour partie, seraient donc concernés. Coupland propose une datation plus tardive pour l'apogée du *vicus* de l'embouchure de la Canche, qui correspondrait au règne de Charles le Chauve, soit à partir de 840 seulement<sup>519</sup>. La période définie pour notre étude semble donc être cohérente avec les périodes d'activité supposée la plus intense pour Dorestad, et peut-être également pour Quentovic.

La comparaison des résultats obtenus pour les monnaies de Quentovic de la BnF avec les exemplaires des autres ateliers ne montre pas de tendance nette qui permettrait de les différencier. Ce ne sont toutefois que cinq exemplaires au nom de cet atelier qui ont été étudiés pour les deux règnes conjoints de Charlemagne et Louis le Pieux, et seulement deux supplémentaires pour la Première période d'émission de Charles le Chauve. Pas plus que la comparaison avec les monnaies carolingiennes contemporaines, l'étude de la composition des pièces de Quentovic à la lumière des analyses antérieures de pièces anglo-saxonnes du début du IX<sup>e</sup> siècle<sup>520</sup> ne permet de mettre en évidence des liens commerciaux entre les deux parties. Si une particularité des monnaies de Quentovic existe réellement du point de vue de la composition, peut-être faudrait-il davantage se tourner vers les pièces de Charles le Chauve : dans les trouvailles comme dans la collection de la BnF, ce

---

<sup>518</sup> (Hodges et Whitehouse, 1996) p. 110.

<sup>519</sup> (Coupland, 2002) p. 210-212.

<sup>520</sup> Voir les résultats dans (Metcalf et Northover, 1989).



sont les exemplaires de cette période qui sont les plus nombreux, et qui supportent l'hypothèse d'une expansion maximale à partir de 840. Il conviendrait donc d'analyser des monnaies carolingiennes et anglo-saxonnes postérieures à cette date, afin d'étudier une éventuelle particularité de composition des exemplaires de Quentovic par rapport aux émissions carolingiennes contemporaines, ainsi qu'un rapprochement avec l'argent frappé outre-Manche.

Tandis que Quentovic semble avoir constitué le lien des Carolingiens avec les Iles Britanniques, le comptoir de Dorestad était lui davantage tourné vers la Scandinavie<sup>521</sup>. Les fouilles intensives du site de l'ancien comptoir Frison ont attesté une période d'occupation et d'activité commerciale la plus intense durant la seconde partie du règne de Charlemagne, et le début de celui de Louis le Pieux. La collection de la BnF est pour cet atelier fidèle à la composition des trouvailles monétaires de la période étudiée : Dorestad est en effet le second atelier le plus représenté (24 échantillons), certes loin du premier (Melle, 68 à 70 exemplaires). Malgré le nombre conséquent de monnaies de cet atelier, et la correspondance de notre période d'étude avec celle qui, selon toute vraisemblance, est celle de l'activité la plus intense qu'ait connu Dorestad au cours de son histoire, il n'est pas apparu d'élément-trace susceptible de différencier l'argent qui y a été monnayé.

L'analyse élémentaire de monnaies de Charlemagne et de Louis le Pieux ne constitue donc pas un moyen efficace pour identifier une éventuelle incorporation d'argent provenant de l'extérieur au stock carolingien par les ateliers de Dorestad et de Quentovic. Contrairement à Venise, dont les monnaies similaires à celles du Type 2 de Louis le Pieux ont révélé des spécificités qui alimentent vraisemblablement la « thèse de Pirenne », les pièces de Dorestad et Quentovic analysées ne sont pas les premières émissions connues pour ces deux ateliers. Ces ports faisaient partie intégrante de l'empire carolingien, au contraire de Venise, et il est vraisemblable que des différences dans l'approvisionnement en argent aient existé entre les officines des comptoirs du nord et de celui de l'Adriatique.

## **5. Les émissions italiennes**

L'Italie du nord est une région particulière du territoire carolingien. Charlemagne conquiert le royaume lombard en 774. Durant les premières années, les ateliers monétaires de l'Italie carolingienne continuent à frapper un monnayage

---

<sup>521</sup> Selon Lebecq, les monnaies de Dorestad circulaient « véritablement » dans la Baltique. Voir (Lebecq, 1983) p. 61. Voir également p. 49-73 pour une étude des trouvailles monétaires à Dorestad, et des pièces de ce nom en dehors de Frise.

d'or altéré, comme cela se faisait auparavant sous les rois lombards. Charlemagne réduit le nombre d'ateliers et impose la frappe du denier d'argent carolingien en Italie vraisemblablement en 781, à la suite du capitulaire de Mantoue<sup>522</sup>. Cependant, les premières monnaies d'argent italiennes émises sous Charlemagne (Type 2) se distinguent de la plupart de celles issues des ateliers situés de l'autre côté des Alpes : elles ne portent pas au revers le nom de l'atelier émetteur, mais la mention R<sub>x</sub>F (*Rex Francorum*) ; de plus, elles sont à la fois plus grandes et plus fines que les autres pièces contemporaines. Puis, après la réforme de 793/4, les monnaies italiennes sont identiques à celles émises dans les autres ateliers.

L'incorporation monétaire de l'Italie au territoire de Charlemagne ne semble s'être faite que progressivement ; en cela le témoignage de la numismatique s'accorderait avec celui de l'histoire de l'administration<sup>523</sup>. Il est donc légitime de s'interroger sur une éventuelle particularité des deniers carolingiens italiens du point de vue de leur composition.

L'Italie apparaît comme un territoire carolingien particulier d'après l'étude des trésors. Si l'on admet la représentativité des données archéologiques, la rareté des trouvailles de monnaies d'époque carolingienne en Italie semble montrer que le denier d'argent n'était pas utilisé pour des échanges de faible valeur. Doit-on en déduire que le denier était utilisé à des seules fins de commerce à grande échelle dans cette partie de l'empire, et non pour les transactions quotidiennes<sup>524</sup> ? Au contraire, les trésors découverts en dehors d'Italie, et les trouvailles jusqu'à Dorestad, suggèrent que les ateliers italiens étaient parmi les plus prolifiques, en particulier sous Louis le Pieux<sup>525</sup>. Rovelli ne partage pas cette appréciation d'une augmentation de la production italienne<sup>526</sup>. La situation spécifique à l'Italie concernant le monnayage est donc assez peu compréhensible.

Le titre des monnaies de notre *corpus* issues d'ateliers italiens a été comparé à celui des exemplaires de mêmes types frappés en dehors d'Italie. Des

---

<sup>522</sup> (Grierson, 1967) p. 506-507.

<sup>523</sup> Voir (Hlawitschka, 1960) et (Bullough, 1962).

<sup>524</sup> (Rovelli 2000) p. 207. Selon cette appréciation, le denier d'argent carolingien avait un pouvoir d'achat relativement haut en Italie – ce qui expliquerait le faible nombre de trouvailles dues à des pertes – et il serait utilisé surtout pour le commerce le long du Pô et la gestion des biens immobiliers. Pour Coupland, qui lui se base sur des textes d'époque carolingienne faisant mention de transactions effectuées en deniers (hors Italie), cette monnaie était d'usage quotidien. (Coupland 2005), p. 212-213.

<sup>525</sup> Sur les deux principaux trésors de monnaies du Type 2 de Louis le Pieux, d'Apremont-Veuillin et de Belvézet, voir *supra* p. 232.

<sup>526</sup> (Rovelli 2000).

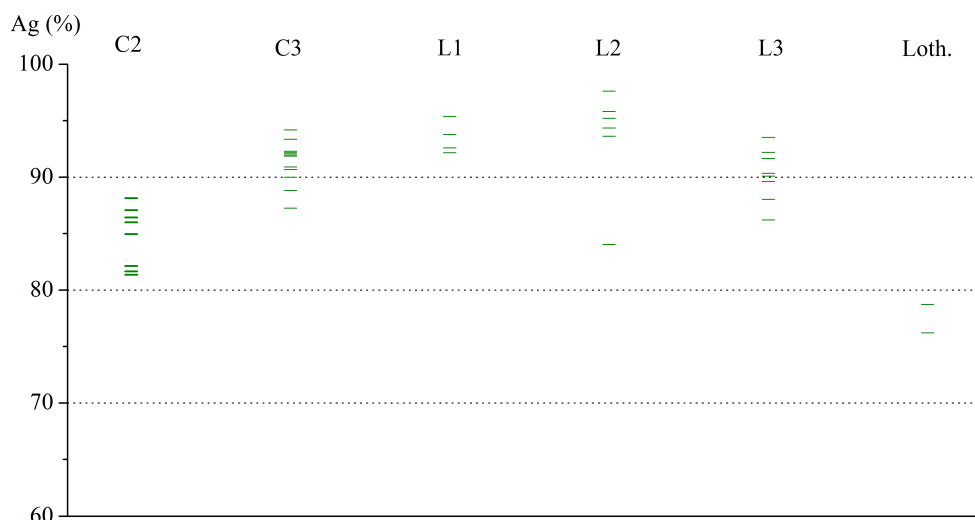
particularités des teneurs en éléments mineurs et traces des émissions cisalpines et transalpines ont également été étudiées.

La comparaison avec les monnaies frappées en dehors d'Italie ne concerne que les deniers : aucune obole carolingienne authentique au nom d'un atelier italien n'est en effet connue.

Les monnaies de Venise, bien que cet atelier soit localisé dans l'Italie moderne, ont été traitées séparément : la cité lacustre n'a jamais fait partie du territoire carolingien d'Italie sous Charlemagne, Louis le Pieux ou Lothaire.

### *a. Le titre d'argent*

L'étude du titre des deniers carolingiens d'Italie montre une progression constante de la teneur moyenne en argent à chaque changement de type monétaire entre 781 et 822/3 (Figure 160).



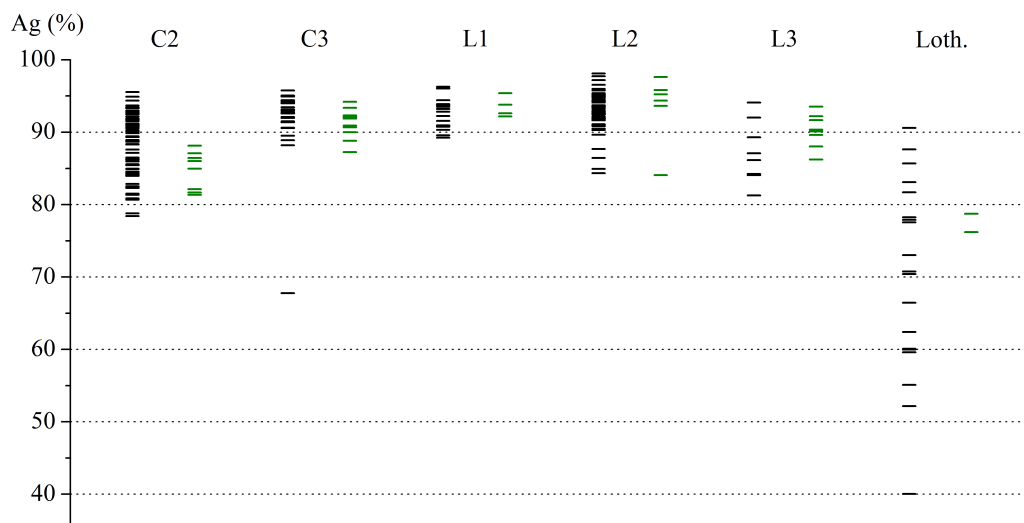
**Figure 160** - Représentation de l'évolution du titre d'argent des deniers frappés en Italie des Types 2 et 3 de Charlemagne, des Types 1 et 2 de Louis le Pieux, de Lothaire, et supposés italiens du Type 3 de Louis le Pieux.

Les deniers analysés du Type 2 de Charlemagne (781-793/4 pour l'Italie), sans mention de l'atelier émetteur, contiennent en moyenne 84,7 % d'argent. Ceux au monogramme du Type 3 (793/4-812) présentent un titre moyen de 91,3 %, soit une augmentation supérieure à six pourcents. Sous Louis le Pieux, cette valeur croît encore légèrement : elle atteint 93,5 % pour les deniers au buste du Type 1 (814-818) puis 95,3 % pour ceux du Type 2 (818-822/3). Par la suite, la teneur moyenne en argent chute légèrement à 90,2 % pour les deniers au temple du Type 3 de Louis le Pieux (822/3-840) dont l'origine est supposée italienne – c'est-à-dire au nom de Milan seulement puisque les exemplaires de Venise sont exclus ici. Enfin, la baisse

du titre moyen est plus prononcée encore pour Lothaire (840-855) : les deux deniers analysés contiennent 76,2 % et 78,7 %.

Les titres des deniers italiens ont été comparés à ceux des exemplaires issus d'autres ateliers pour les Types 2 et 3 de Charlemagne, les Types 1, 2 et 3 de Louis le Pieux, et les émissions de Lothaire. Pour les monnaies du Type 3 de Louis le Pieux, les noms d'ateliers n'apparaissent pas au revers, et les lieux de frappe sont supposés d'après la classification stylistique de Coupland<sup>527</sup>.

La comparaison des titres d'argent déterminés pour les deniers italiens avec ceux frappés en dehors de cette zone du territoire carolingien montre des écarts entre les deux monnayages pour certains types monétaires, et une évolution différente pour la période étudiée (Figure 161).



**Figure 161** - Comparaison des titres d'argent des monnaies carolingiennes italiennes avec celles issues des autres ateliers pour les Types 2 et 3 de Charlemagne, les Types 1, 2 et 3 de Louis le Pieux et Lothaire.

Les monnaies de Charlemagne frappées en Italie semblent contenir légèrement moins d'argent que les autres. Celles du Type 2 contiennent entre 81 % et 88 % d'argent, tandis que les bornes minimale et maximale sont de 78 % et de 96 % pour les autres. Les moyennes respectives sont de 84,7 % pour l'Italie et de 88,2 % pour les autres ateliers. Le faible nombre de deniers italiens peut être à l'origine de la différence observée. Il paraît néanmoins remarquable que la majorité des pièces frappées en dehors d'Italie contient plus d'argent que la plus pure des monnaies analysées frappées dans l'ex-royaume lombard.

<sup>527</sup> (Coupland, 1990) p. 36.

La tendance observée pour le Type 2 de Charlemagne semble se poursuivre, de manière certes moins marquée, pour le Type 3 (Figure 161). Les deniers italiens au monogramme carolin contiennent en moyenne 91,3 % d'argent, et les douze titres déterminés sont compris entre 87 % et 94 % ; pour les autres exemplaires analysés, la moyenne est de 92,7 % et les titres compris entre 88 % et 96 % d'argent. Les écarts sont toutefois relativement faibles, et seul un nombre d'analyses comparable entre l'Italie et les autres ateliers carolingiens permettrait de confirmer cette légère tendance.

Sous Louis le Pieux, le titre d'argent des pièces italiennes est comparable, voire supérieur, à celui des pièces frappées en dehors de cette zone de l'empire.

Pour les exemplaires cisalpins et transalpins du Type 1 de Louis le Pieux, les moyennes sont exactement identiques à 93,5 %. Les bornes minimale et maximale sont plus resserrées pour les monnaies italiennes que pour les autres, mais cela s'explique sans doute par le faible nombre de pièces de ce type analysées pour cette région (quatre exemplaires).

Pour le Type 2 de Louis le Pieux, les monnaies italiennes présentent un titre moyen légèrement plus élevé que les autres de près de 2 % (95,3 % contre 93,5 %), si l'on exclut Prou 903 de Pavie dont le titre de 84 % seulement n'est pas cohérent avec les autres exemplaires de la même période. L'analyse d'autres pièces italiennes de ce type permettra de confirmer cette tendance ou révélera au contraire une similarité entre les pièces du Type 2 de Louis le Pieux frappées en Italie ou non du point de vue du titre d'argent.

Les monnaies du Type 3 de Louis le Pieux attribuables à l'Italie carolingiennes sont celles de Milan uniquement, si l'on se fonde sur le classement proposé par Coupland<sup>528</sup>. Les huit exemplaires analysés supposés de cet atelier contiennent en moyenne 90,2 %, soit près de 4 % de plus que celles frappées de l'autre côté des Alpes (87,3 %). Ici encore, la tendance observée mériterait d'être confirmée par un nombre d'analyses plus large. Il reste toutefois possible que l'atelier de Milan ait maintenu un standard d'argent plus élevé que les autres ateliers de l'empire, par exemple situés en Austrasie ou en Neustrie, qui furent victimes des premières incursions nordiques durant les années de frappe des monnaies du Type 3 de Louis le Pieux.

Les deux deniers italiens de Lothaire analysés contiennent 77,5 % d'argent en moyenne. Le titre moyen des monnaies de ce même souverain frappées en

---

<sup>528</sup> Voir (Coupland, 1990) p. 43-44. MEC identifie des pièces de Pavie pour cette période, d'après la forme de la croix et la gravure des lettres caractéristique de l'Italie (« *Italianate lettering* »). Voir MEC p. 217.

dehors d'Italie est de 70,1 %. La différence observée peut être due au faible nombre de monnaies italiennes analysées. D'autres analyses sont nécessaires afin de déterminer si les titres des pièces de Lothaire frappées en Italie se regroupent entre 75 % et 80 % d'argent, ou si au contraire une variabilité importante existe comme pour le reste de la Francie Médiante.

Les observations numismatiques de Coupland rejoignent la tendance qui semble se dessiner pour les émissions italiennes : si des analyses ultérieures confirment la spécificité des exemplaires italiens de Lothaire du point de vue du titre, celle-ci pourrait traduire la particularité de ce territoire qui ressort de l'étude purement numismatique. Coupland remarque en effet une coupure de l'Italie du reste du territoire du point de vue de la circulation monétaire ; la route commerciale de la vallée du Pô jusqu'au nord du territoire carolingien à travers les Alpes, qui semble avoir constitué un axe de première importance durant les règnes de Charlemagne et de Louis le Pieux, semble largement délaissée sous Lothaire<sup>529</sup>. La coupure de la Méditerranée liée à l'insécurité due aux incursions Arabes pourrait avoir été à l'origine d'une rupture des liens entre Occident et Orient, qui semblent s'être réorganisés à partir des possessions byzantines d'Italie, en particulier Venise, durant les quelques décennies qui encadrent l'an 800. Cette coupure méditerranéenne ayant tari l'approvisionnement oriental des Carolingiens, les voies de circulation entre l'Italie et le nord du territoire de Lothaire perdaient leur sens. Les réseaux d'échanges en Italie et dans le nord du territoire de Lothaire se seraient cloisonnés, et le titre des deniers d'argent aurait évolué de manière différente. La confrontation des sources analytiques et numismatiques avec les données historiques et archéologiques permettrait de confirmer cette hypothèse.

En dehors des monnaies du Type 2 de Charlemagne, pour lequel la faiblesse relative du titre des deniers italiens semble réelle, des analyses complémentaires sont nécessaires afin de confirmer les tendances dessinées par nos analyses pour les types ultérieurs. Pour les deniers du Type 2 de Charlemagne, les différences de composition des exemplaires italiens semblent être liées à leurs particularités numismatiques et historiques : la particularité de la légende du revers, les flans plus larges et le type de gravure caractéristique, ainsi que les années d'émission spécifiques, semblent aller de pair avec un titre d'argent plus faible des deniers. Peut-être cela reflète-t-il l'intégration progressive de l'Italie du Nord à l'empire carolingien. Car par la suite, les monnaies italiennes présentent des caractéristiques numismatiques identiques aux autres, et leurs titres d'argent sont comparables voire supérieurs sous Louis le Pieux.

---

<sup>529</sup> (Coupland, 2001) p. 193.

### ***b. Les éléments mineurs et traces***

Aucun des éléments mineurs et traces ne semble caractériser les monnaies carolingiennes d'Italie analysées, quel qu'en soit le type ou la période d'émission.

Les teneurs globales en éléments mineurs et traces sont comparables à celles observées pour le reste du territoire carolingien. Les monnaies italiennes du Type 2 de Charlemagne contiennent en moyenne 1,8 % d'impuretés, les autres 1,7 %. Pour les types suivants, les moyennes sont identiques pour l'Italie et le reste du territoire jusqu'en 822/3 : 1,2 % pour le Type 3 de Charlemagne et le Type 1 de Louis le Pieux, puis 1,1 % pour le Type 2 de Louis le Pieux. Une différence qui devra être confirmée apparaît pour les deniers au temple du Type 3 de Louis le Pieux : la somme des teneurs en éléments mineurs et traces reste stable pour l'Italie (1,3 % en moyenne), tandis qu'elle augmente sensiblement pour les autres ateliers étudiés (2,1 %). Pour Lothaire, les pièces italiennes analysées contiennent en moyenne 2,7 % d'impuretés et les autres 5,4 %. Le denier de Milan Prou 910 est le seul parmi tous ceux de ce souverain dont l'argent semble avoir été affaibli avec du cuivre relativement pur et non du laiton.

Il semble donc que la réforme de Charlemagne de 793/4 ait contribué, en Italie comme ailleurs, à améliorer la pureté des alliages monétaires. La somme des impuretés baisse de manière sensible après cette date et se maintient à une valeur très faible jusqu'en 822/3. Par la suite, les monnaies italiennes semblent contenir une quantité d'impuretés plus faibles que les autres. Cela mériterait d'être confirmé par un nombre d'analyses plus conséquent. Si la tendance se vérifie, peut-être le titre légèrement plus élevé et la quantité d'impuretés plus faible des émissions italiennes des années 822/3-855 peuvent-elles traduire une insécurité moindre de ce territoire en comparaison à la Neustrie, la Frise ou l'Aquitaine.

## **6. Venise**

Les monnaies frappées au nom de Venise durant la première moitié du IX<sup>e</sup> siècle présentent, pour la plupart d'entre elles, les mêmes caractéristiques que les émissions carolingiennes contemporaines : la titulature du souverain franc, Louis le Pieux le plus souvent, mais également plus tard Lothaire, y apparaît ; le nom de l'atelier de frappe est inscrit de la même manière que pour n'importe quelle autre officine pour les types monétaires sur lesquels cette information apparaît ; module et masse sont enfin sensiblement identiques. L'étude des trésors de Louis le Pieux en particulier montre que les pièces au nom de Venise circulaient dans l'ensemble du territoire carolingien, et qu'elles étaient intégrées à la circulation monétaire comme celles de n'importe quel atelier.

Les monnaies de Venise frappées selon le type carolingien doivent toutefois être considérées avec une attention particulière : il ne s'agit en effet pas de monnaies carolingiennes à proprement parler. La jeune cité des doges n'a, à aucun moment, été dominée par les Carolingiens. Son statut de territoire byzantin d'Italie très éloigné de sa tutelle lui permettait de bénéficier d'une indépendance de fait.

Les conditions de la fabrication monétaire à Venise durant les années de règne de Louis le Pieux et de Lothaire ne sont pas connues. Il est envisageable que le statut particulier de cette cité, par rapport aux villes sous domination carolingienne, se retrouve du point de vue de la composition des alliages monétaires.

Les premières monnaies connues au nom de Venise sont des deniers frappés selon le Type 2 de Louis le Pieux entre 818 et 822/3. Par la suite, il est supposé que des deniers au temple du Type 3 de Louis le Pieux (822/3-840) ont été émis par la cité lacustre<sup>530</sup>, bien que le lieu de frappe n'apparaisse pas sur ces pièces. L'atelier vénitien a également frappé des deniers du Type *Xpe Salva Venecias*, dont la période d'émission pourrait être identique à celle des monnaies du Type 3 de Louis le Pieux. Pour les pièces de ces trois types, le titre des exemplaires vénitiens ou supposés vénitiens de notre *corpus* a été comparé à celui des deniers contemporains italiens et du reste de l'empire carolingien.

Le rôle commercial de Venise entre l'Adriatique, l'Afrique du Nord et l'Orient Arabe et Byzantin qui s'amorce durant la seconde moitié du VIII<sup>e</sup> siècle nous a, de plus, semblé justifier une étude spécifique des monnaies vénitiennes de notre *corpus* : dans une optique « pirénienne », l'éventualité d'une arrivée d'argent arabe ou byzantin dans l'économie carolingienne par Venise a pu ainsi être étudiée à travers les teneurs en éléments mineurs et traces.

La seule monnaie vénitienne de Lothaire analysée (Prou 921) est un faux moderne<sup>531</sup>, la comparaison avec les autres ateliers n'a donc pas été possible pour les pièces de ce souverain.

#### ***a. Le titre d'argent***

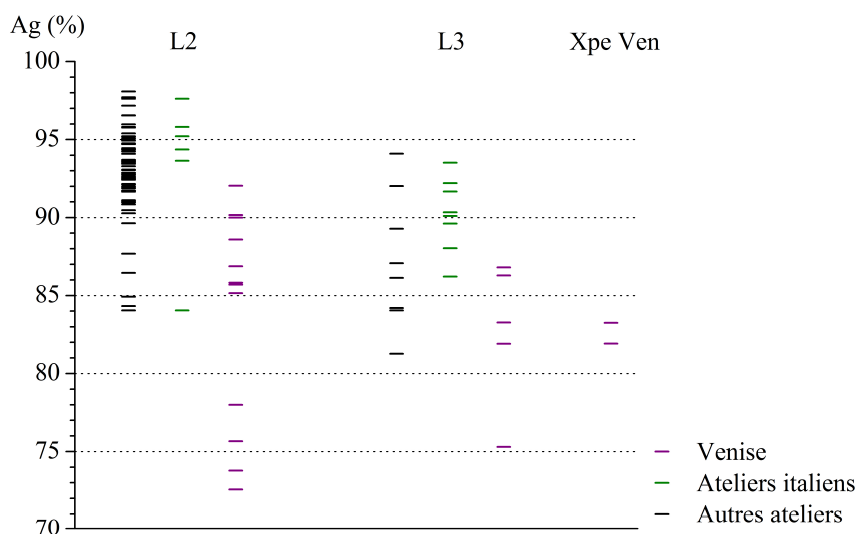
La comparaison des titres d'argent des deniers vénitiens d'une part, avec celui des monnaies contemporaines frappées en Italie et dans le reste du territoire carolingien d'autre part, apparaît sur la Figure 162.

---

<sup>530</sup> (Coupland, 1990) p. 43-44.

<sup>531</sup> Voir *supra* p. 306.





**Figure 162** - Représentation graphique du titre d'argent des deniers vénitiens ou supposés et de celui des monnaies contemporaines d'Italie et du reste de l'empire carolingien.

Les monnaies vénitiennes du Type 2 de Louis le Pieux contiennent en moyenne 83,7 % d'argent. Les teneurs déterminées sont comprises entre 72 % et 92 %. L'écart-type relatif calculé à partir des douze valeurs prises en compte est supérieur à 8 %.

Les titres d'argent des monnaies de ce type au nom de Venise sont sensiblement plus faibles et plus dispersés que ceux des pièces de la même période issus d'ateliers sous domination carolingienne, en Italie ou ailleurs : les titres moyens sont supérieurs à 93 % pour ces deux derniers groupes de monnaies, et leurs écarts-types relatifs de l'ordre de 2 % à 3 %, si l'on exclut les cinq échantillons qui présentent un titre plus faible que le groupe formé par les soixante-et-onze autres.

Les monnaies de Venise frappées selon le Type 2 de Louis le Pieux présentent donc deux caractéristiques principales qui les différencient des exemplaires contemporains frappés dans des ateliers sous domination carolingienne : elles contiennent en moyenne environ dix pourcents d'argent en moins, et les valeurs sont bien plus dispersées pour cet unique atelier que pour l'ensemble des autres.

A la lumière de ces nouvelles analyses, on constate que cette différenciation des deniers de Venise était décelable en se référant aux quelques résultats obtenus par le passé pour des deniers émis entre 818 et 822/3 : Coupland, dans son article sur le monnayage de Louis le Pieux, constatait en reprenant les résultats publiés antérieurement, que le denier de Venise dont le titre avait été déterminé contenait

moins d'argent que les autres<sup>532</sup>. Sa teneur en métal précieux était en effet inférieure à 90 % alors que pour les quatre autres, issus d'ateliers situés entre Seine et Rhin, cette valeur était comprise entre 93 % et 97 %. Ces quelques résultats étaient bien entendu insuffisants pour conclure ce qui semble dorénavant indiscutable : les deniers vénitiens de Louis le Pieux contiennent en moyenne moins d'argent que ceux frappés dans l'empire carolingien, en Italie ou ailleurs, où la standardisation du titre est sans commune mesure.

La Figure 162 peut laisser croire que deux groupes de deniers vénitiens se distinguent de par leur titre d'argent : l'un au-dessus de 85 %, l'autre au-dessous de 80 %. L'étude numismatique des monnaies concernées ne permet pas de retrouver cette différenciation : à l'exception du denier référencé BnF 1982-63 dont la légende du revers est en trois lignes, tous les autres forment un groupe homogène. Les deux groupes de pièces se différencient-ils par leurs teneurs en éléments-traces ? Nous verrons que ce n'est pas non plus le cas. Une évolution du titre d'argent durant la période 818-822/3 n'est pas impossible mais paraît peu probable. Il semble donc que la répartition des titres observés en deux sous-groupes s'explique par les incertitudes induites par un échantillon d'effectif limité. Il est donc légitime de penser qu'il n'y aurait qu'un seul groupe caractérisé avant tout par une large dispersion où le hasard ne nous aurait pas permis d'observer de deniers correspondant aux valeurs médianes.

L'examen des résultats obtenus sur les deniers du Type 3 de Louis le Pieux attribués à Venise sur la base de leurs caractères stylistiques montre que le titre moyen est comparable aux monnaies du type précédent de ce même atelier (82,7 % et 83,7 %). Les pièces des années 822/3-840 attribuées à Venise par l'étude numismatique sont d'un titre plus faible que celles attribuées à Milan (en moyenne 82,7 % contre 90,2 %), et aux autres ateliers carolingiens (87,3 %), bien qu'une baisse de la pureté soit observée en dehors de Venise lors du passage du Type 2 au Type 3 de Louis le Pieux.

Ces résultats semblent confirmer la classification des deniers du Type 3 de Louis le Pieux proposée par Coupland : les monnaies attribuées à Venise contiennent en effet moins d'argent en moyenne que les autres. On retrouve ainsi la même différenciation des deniers vénitiens du point de vue du titre que pour le type précédent, de manière certes moins marquée. La dispersion des valeurs pour les deniers du Type 3 de Louis le Pieux attribués à Venise reste significative (écart-

---

<sup>532</sup> « ...and a denier of Venice had the slightly slower, but still respectable figure of 89,8 % silver » dans (Coupland, 1990) p. 29.

type relatif de 5,6 %). Une étude complète intégrant un nombre d'analyses plus représentatif serait nécessaire pour confirmer les tendances observées à partir de ces quelques résultats pour les monnaies au temple de Louis le Pieux attribuées à Venise.

Le titre d'argent des deniers du Type *Xpe Salva Venecias* est sensiblement identique à celui des exemplaires du Type 3 de Louis le Pieux attribués à Venise (en moyenne 82,6 % et 82,7 %). Cela n'est toutefois pas suffisant pour conclure quant à la contemporanéité ou la succession de ces deux types monétaires.

Les principaux auteurs ayant traité du monnayage de Louis le Pieux ont bien relevé la particularité de la frappe de deniers carolingiens à Venise dans leurs travaux<sup>533</sup>. Il est en effet singulier que les premières monnaies connues frappées au nom de Venise (Type 2 de Louis le Pieux entre 818 et 822/3), alors théoriquement sous domination byzantine, portent le nom d'une autre autorité – certes plus proche géographiquement. Cela est symptomatique du désir des Vénitiens de se développer économiquement en tirant profit au maximum de la situation extraordinaire dont la ville bénéficie.

Toutefois, ni l'étude des types monétaires ni celle des trésors n'avait permis de relier la particularité de ce monnayage à une éventuelle différenciation du point de vue numismatique. Seul Bompois, dans sa publication du trésor d'Apremont-Veuillin, lequel contenait 195 deniers de Venise sur 753 monnaies du Type 2 de Louis le Pieux (soit 26 % du total), avait relevé : « *Le poids de tous ces deniers de Venise est beaucoup plus variable que dans les autres séries, fait qui s'explique d'autant moins aisément que leur belle conservation est presque exactement la même chez tous.*<sup>534</sup> ». Malheureusement, l'auteur juge « *aussi monotone qu'ennuyeuse*<sup>535</sup> » pour le lecteur l'énumération des masses de tous les deniers de ce trésor, et il n'est donc pas possible de vérifier les bases de cette remarque.

Nos observations sur la masse des monnaies corroborent celles de Bompois : les deniers de Venise sont globalement plus légers que ceux des autres ateliers, et ce malgré leur excellent état. Si l'on représente les masses des deniers

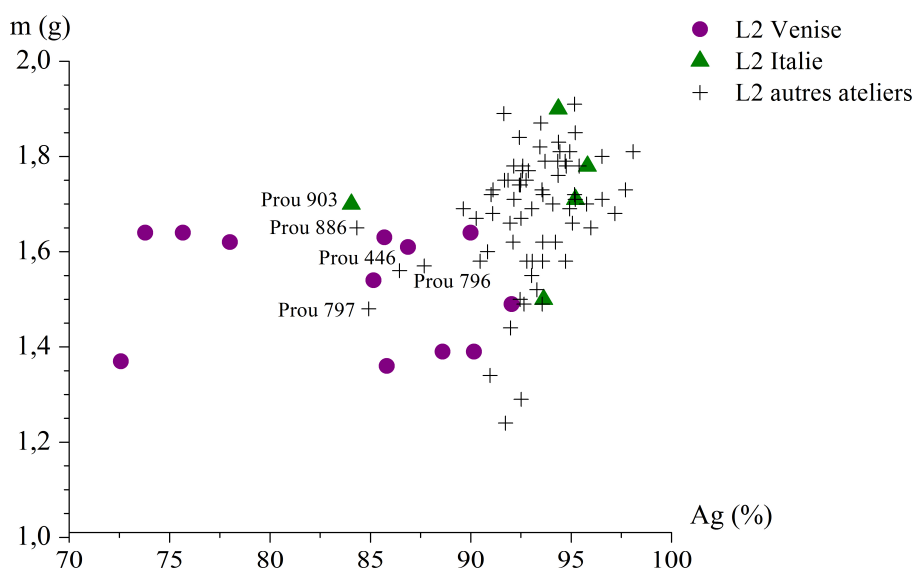
---

<sup>533</sup> MEC p. 196 : « *At no time in this period, however, was imperial sovereignty over Venice a reality, and it is no more than a matter of convenience that the coins are catalogued here under the rulers whose names they bear* » ; et p. 217 : « *How it came about that Venice, which was still formally part of the Byzantine Empire, minted Western-type silver denari in the names of Carolingian sovereigns from Louis' Class 2 onwards is something of a mystery.* ». Voir également (Coupland, 1990) p. 32 : « *It is particularly unexpected to find Venetian coins minted in Louis' name, since the port was theoretically independent of Carolingian rule.* ».

<sup>534</sup> (Bompois, 1871) p. 49.

<sup>535</sup> (Bompois, 1871) p. 49.

vénitiens, italiens et d'autres ateliers du Type 2 de Louis le Pieux analysés en fonction de leur titre (Figure 163), on constate que les monnaies de Venise se détachent des autres selon les deux critères représentés : ce n'est donc pas seulement leur pureté d'argent qui est inférieure à celle des exemplaires des autres ateliers, mais également leur masse.



**Figure 163** - Représentation graphique du titre d'argent des deniers du Type 2 de Louis le Pieux de Venise, des ateliers d'Italie carolingienne et des autres ateliers en fonction de leur masse.

Les masses moyennes pour les deniers du Type 2 de Louis le Pieux sont respectivement de 1,53 g pour Venise, de 1,72 g pour les ateliers carolingiens d'Italie du Nord, et de 1,68 g pour ceux situés de l'autre côté des Alpes. Par rapport aux exemplaires issus d'ateliers carolingiens d'Italie, la masse des deniers vénitiens est inférieure à 1,65 g dans tous les cas, tandis que les autres, à l'exception d'une, pèsent au moins 1,70 g (Figure 163). Pour l'ensemble de l'empire, la situation est similaire : environ deux tiers des monnaies sont plus lourdes que 1,65 g, et celles de Venise sont parmi les plus légères.

Des groupes distincts semblent se dessiner parmi les monnaies vénitiennes sur la Figure 163 si l'on observe le seul critère de la masse : quatre d'entre elles sont plus légères que 1,4 g ; deux présentent des masses de l'ordre de 1,5 g, et les six autres sont plus lourdes que 1,6 g. Ces regroupements ne sont pas corrélés aux différences de titre d'argent de ces pièces. Cela suggère que certains des deniers vénitiens ont été frappés selon un standard de masse proche de celui des exemplaires carolingiens contemporains, mais qu'une fraction importante présente une masse nettement plus faible. Ces observations rejoignent ici encore celles de Bompois qui, bien qu'il ne présente pas individuellement les masses des deniers

vénitiens du trésor d'Apremont-Veuillin, remarque non pas un regroupement de l'ensemble des valeurs autour d'un standard plus faible que celui des autres exemplaires contemporains, mais une variabilité plus grande<sup>536</sup>.

Il semble donc que la masse des monnaies vénitiennes du Type 2 de Louis le Pieux, à l'instar de leur titre d'argent, soit plus faible en moyenne que celle des exemplaires des autres ateliers, qu'ils soient situés en Italie carolingienne ou en dehors.

Les points correspondants aux cinq deniers de titre légèrement inférieur aux autres, mis en évidence sur la Figure 163, montrent que leur masse est également comprise dans une gamme de valeurs relativement faibles, en comparaison avec les exemplaires non-vénitiens. Il s'agit là d'une deuxième caractéristique commune entre ces cinq deniers et ceux de Venise.

Il semble que la masse légèrement plus faible des deniers frappés à Venise selon le Type 2 de Louis le Pieux, que l'on observe aujourd'hui, reflète la réalité de la production des deniers dans cette ville et à cette époque. On aurait donc, en plus de la « fraude » des Vénitiens sur le titre d'argent, une économie réalisée sur la masse des deniers. Le poids de fin contenu dans ces alliages est donc doublement amoindri par rapport à celui des exemplaires contemporains des ateliers carolingiens. Toutes ces observations, qu'elles soient métrologiques ou analytiques, corroborent une singularité historique certes connue, mais que l'observation numismatique seule n'avait pas permis de confirmer.

L'histoire de Venise à l'époque carolingienne et de son premier essor commercial est également riche d'enseignements<sup>537</sup>.

A l'orée du VIII<sup>e</sup> siècle, le commerce trans-méditerranéen de l'Europe occidentale a largement disparu<sup>538</sup>. L'Italie du Nord et du Centre est occupée par les Lombards, et seules quelques villes côtières de ces régions demeurent sous domination byzantine<sup>539</sup>. Outre une présence administrative byzantine, les hameaux qui deviendront Venise, à l'instar de leur premier rival Comacchio, s'adonnaient vraisemblablement surtout à la pêche et au commerce du sel<sup>540</sup>.

Alors que les communications maritimes de longue distance passant par Marseille et la vallée du Rhône semblent fort réduites, Venise donne les premiers

---

<sup>536</sup> (Bompois, 1871) p. 49.

<sup>537</sup> Voir (Pirenne *et al.*, 1992) p. 129-132, (McCormick, 2007) p. 43-70, et (McCormick, sous presse). Voir pour une histoire détaillée des origines et de l'émergence de Venise (Cracco Ruggini *et al.*, 1992) et (Ammerman, sous presse).

<sup>538</sup> (Pirenne *et al.*, 1992) p. 122. (McCormick, 2001) p. 433-443.

<sup>539</sup> (Brown, 1991).

<sup>540</sup> Voir (McCormick, sous presse) et (Ammerman, sous presse).

signes de son émergence commerciale à la fin de la première moitié du VIII<sup>e</sup> siècle : un commerce méditerranéen se laisse détecter depuis le port de l'Adriatique d'abord vers la côte ouest de l'Italie et l'Afrique, puis vers le Proche-Orient<sup>541</sup>. A la fin du VIII<sup>e</sup> siècle, les marchands vénitiens naviguent régulièrement jusqu'en Palestine<sup>542</sup>.

Le dynamisme économique de Venise suscite alors les intérêts des souverains byzantins et carolingiens. Pépin, fils de Charlemagne, est envoyé dès 803 pour conquérir le port. Malgré des tentatives répétées, il se heurtera à la flotte de Nicéphore I<sup>er</sup> jusqu'à sa mort en 810 ; le marché tant convoité demeurera sous la souveraineté byzantine. Parallèlement, Comacchio, principale rivale de Venise dans l'Adriatique, est attaquée par la flotte byzantine durant l'hiver 808-809, et ne s'en relèvera pas. Ayant échoué dans sa tentative de conquête de Venise, l'empire carolingien restera un domaine essentiellement terrestre – exception faite des *emporia* tournés vers le nord de Dorestad et Quentovic.

Un traité est signé en 812 entre Charlemagne et le *basileus* Michel I<sup>er</sup>. Le Carolingien y concède la souveraineté byzantine sur Venise, tandis que le Byzantin reconnaît le titre d'empereur d'Occident de Charles<sup>543</sup>. C'est vraisemblablement à la suite de cet accord que le dernier type monétaire de Charlemagne, sur lequel figure au droit le buste de l'empereur drapé et lauré à la manière des empereurs romains, a été émis.

Après ce traité, Venise tirera encore davantage profit de son exceptionnelle situation de port susceptible d'offrir aux Européens les denrées de luxe qu'ils affectionnent, tandis que ceux-ci procurent aux Arabes esclaves, fourrures et armes<sup>544</sup>. Le premier accord commercial conclu entre Carolingiens et Vénitiens qui soit parvenu jusqu'à nous date de 840, et, dans une mesure qui semble difficile à préciser, dépend de textes antérieurs semblables mais perdus<sup>545</sup>. Nous insistons bien sur le fait que les relations commerciales entre les deux parties y figurent clairement, mais qu'il n'y est pas question de la frappe monétaire.

Tout porte à croire que Charlemagne et son successeur soient parvenus à exercer un contrôle strict de l'émission des monnaies dans les ateliers situés au sein leur empire. Mais dans quelles conditions s'opérait la frappe monétaire à Venise ? Comment, pour l'autorité carolingienne, imposer aux monnayeurs vénitiens, dans

---

<sup>541</sup> (McCormick, 2001) p. 523-526.

<sup>542</sup> (McCormick, 2001) p. 77-82 et (McCormick, sous presse).

<sup>543</sup> Pour la chronologie des guerres byzantino-franques autour de Venise voir (McCormick, 2001) p. 892-899.

<sup>544</sup> (McCormick, 2001) p. 708-777.

<sup>545</sup> MEC p. 196 ; (McCormick, 2001), p. 334 et p. 633.

une cité étrangère, le respect des édits régissant l'émission des monnaies? Le titre plus faible observé pour les deniers de Venise démontre clairement que cet atelier n'était pas soumis à un contrôle aussi strict que ceux situés dans les frontières de l'empire ; la dispersion des valeurs des titres des monnaies renforce cette hypothèse : forts de leur indépendance de fait et de l'opportunité qu'ils ont saisie de battre monnaie pour une autorité extérieure, les Vénitiens ont émis des deniers contenant moins de métal précieux que les autres ateliers frappant des monnaies théoriquement équivalentes à tout point de vue. Et quand bien même l'autorité carolingienne se serait aperçue de cette fraude, elle n'avait vraisemblablement aucun moyen de contraindre les monnayeurs vénitiens à se conformer au standard monétaire occidental. Rien de surprenant donc, dans de telles conditions, à ce que les Vénitiens aient profité de leur situation, *a fortiori* quand on sait qu'ils furent à cette époque les marchands les plus dynamiques de la chrétienté méditerranéenne<sup>546</sup>.

Nos résultats analytiques semblent souligner l'habileté des Vénitiens. A Venise elle-même, la monnaie arabe et peut-être byzantine circulait durant la période examinée ici. On serait donc enclin à croire que la frappe de deniers du style carolingien à Venise était motivée surtout par les échanges avec l'empire franc, ce qui n'est pas contredit par la fréquence des trouvailles de monnaies frappées à Venise sur le territoire carolingien. En frappant des pièces de moindre valeur intrinsèque et en s'en servant pour payer ce qu'ils achetaient aux Francs, les Vénitiens auront réalisé un double bénéfice : le profit provenant de la frappe elle-même, et celui consistant à acheter des biens avec une monnaie de valeur moindre que sa dénomination formelle.

L'étude des éléments mineurs et traces contenus dans l'argent utilisé pour la fabrication des premières monnaies vénitiennes, frappées à partir de 818 selon le Type 2 de Louis le Pieux, apporte elle aussi de nouveaux éléments de réflexion pour la connaissance de Venise autour de 800 et son implication dans le commerce méditerranéen.

### ***b. Les éléments mineurs et traces***

La somme des teneurs en éléments mineurs et traces pour les monnaies de Venise est comparable avec celles déterminées pour les deniers frappés en Italie et dans le reste de l'empire carolingien des mêmes périodes. Les moyennes sont,

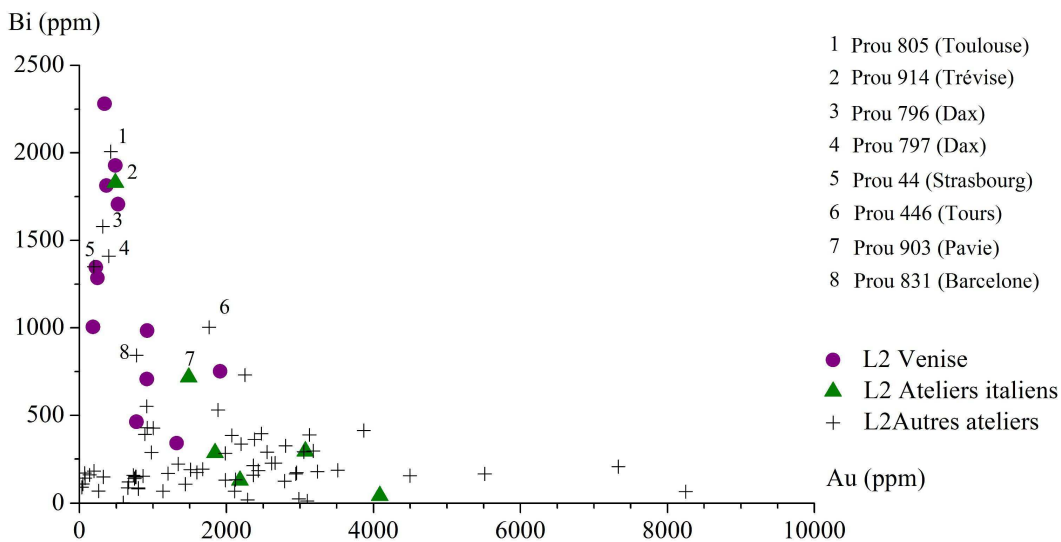
---

<sup>546</sup> « *De tous les prolongements byzantins vers l'ouest, le plus important et le plus original, c'est l'extraordinaire Venise, la plus curieuse réussite de l'histoire économique de tous les temps avec celle des Provinces-Unies* » dans (Pirenne *et al.*, 1992) p. 129 ; « *In the Veneto, everything smells of commerce.* » dans (McCormick, 2001) p. 633.

comme pour les pièces similaires des autres ateliers, comprises entre 1 % et 2 % pour les deniers vénitiens des Types 2 et 3 de Louis le Pieux, ainsi que pour ceux du Type *Xpe Salva Venecias*. Ce n'est donc pas la présence d'une grande quantité d'impuretés qui est à l'origine de la différence observée du point de vue du titre entre les monnaies vénitiennes et les autres, mais sans doute l'ajout de cuivre en quantité plus importante.

Parmi les éléments mineurs et traces dosés par LA-ICP-MS, deux se sont révélés particulièrement intéressants pour les monnaies vénitiennes du Type 2 de Louis le Pieux : l'or et le bismuth. L'examen des teneurs de ces deux éléments (Figure 164) met en évidence que les pièces de ce type frappées à Venise contiennent d'une manière générale peu d'or, et présentent des teneurs en bismuth relativement élevées par rapport aux autres échantillons de la même période. Les points correspondant aux échantillons vénitiens s'alignent pour l'essentiel selon l'axe du bismuth en ordonnée sur la Figure 164, tandis que le nuage formé par les autres s'étire le long de l'axe de l'or en abscisse.

Seuls quelques rares exemplaires parmi les soixante-et-onze analysés et frappés en dehors de Venise s'immiscent dans le groupe des échantillons vénitiens sur la Figure 164 : les teneurs en bismuth sont inférieures à 500 ppm pour la plupart d'entre elles, alors que deux monnaies vénitiennes seulement sur les douze analysées présentent des teneurs aussi faibles.



**Figure 164** - Représentation des teneurs en bismuth en fonction des teneurs en or pour les monnaies du Type 2 de Louis le Pieux frappées à Venise, en Italie carolingienne et dans le reste de l'empire.



Parmi les huit monnaies du Type 2 de Louis le Pieux frappées d'un autre nom que celui de Venise et qui présentent des titres élevés en bismuth, quatre sont remarquables de par la faiblesse de leur titre d'argent : Prou 796 et Prou 797 de Dax, Prou 446 de Tours et Prou 903 de Pavie ne contiennent en effet que 84 % à 88 % d'argent. Ces quatre échantillons, auxquels s'ajoute un denier de Marseille (Prou 886) avaient été remarqués lors de l'interprétation du titre des deniers du Type 2 de Louis le Pieux<sup>547</sup>. Leurs titres d'argent et leurs masses relativement faibles, ainsi que leurs teneurs en or et en bismuth, les rapprochent des monnaies de Venise.

Il est remarquable que quatre des cinq pièces de ce type frappées en dehors de Venise dont le titre est sensiblement plus faible que celui des autres présentent des signatures en éléments-traces similaires à celles des deniers vénitiens de la même période. Parmi les quatre autres deniers à forte teneur en bismuth repérés sur la Figure 164, la proximité géographique du lieu de frappe avec Venise pourrait expliquer la forte teneur en bismuth pour le denier de Trévise Prou 914, bien que sa teneur en argent soit élevée et conforme au standard du Type 2 de Louis le Pieux (93,6 %). Pour les trois autres (Prou 44 de Strasbourg, Prou 805 de Toulouse et Prou 831 de Barcelone), les titres d'argent sont plutôt conformes à ce qui est la norme en dehors de Venise pour les frappes des années 818-822/3, et aucune hypothèse ne peut être émise quant à leurs teneurs élevées en bismuth.

Deux des huit monnaies à forte teneur en bismuth mises en évidence sur la Figure 164, en dehors de celles de Venise, sont d'origine italienne : Prou 903 de Pavie et Prou 913 de Trévise. Parmi les six autres, quatre sont issues d'ateliers monétaires situés en Espagne ou dans une zone proche : Prou 831 de Barcelone, Prou 796 et Prou 797 de Dax, et Prou 805 de Toulouse. Des liens avec l'Espagne Omeyyade pourraient être soulignés par cette signature chimique spécifique en or et en bismuth. Nous le verrons plus loin, des teneurs élevées en bismuth semblent être une caractéristique de certains gisements d'argent situés au début du IX<sup>e</sup> siècle dans le Califat Abbasside<sup>548</sup>. Il pourrait être envisageable que de l'argent venu d'Orient à l'époque du Califat Omeyyade jusqu'en Espagne, contenant des quantités de bismuth importantes, ait été refondu puis refrappé au début du IX<sup>e</sup> siècle, du temps du Califat de Cordoue. Des échanges commerciaux avec la Marche d'Espagne ou le sud de l'Aquitaine pourraient alors avoir contribué à intégrer cet argent au stock utilisé pour la frappe monétaire dans les ateliers carolingiens de ces régions. Les récents travaux de Parvérie sur les trouvailles de monnaies arabes en Septimanie et en Aquitaine aux VIII<sup>e</sup> et IX<sup>e</sup> siècles vont dans le

---

<sup>547</sup> Voir *supra* p. 324 et Figure 121.

<sup>548</sup> Voir *infra* p. 430.

sens de cette hypothèse<sup>549</sup>. La comparaison de résultats d'analyses portant sur des monnaies carolingiennes du sud-ouest du territoire de Louis le Pieux et sur des pièces d'argent contemporaines du califat Omeyyade pourrait permettre d'éclairer cette question.

En plus de leur titre plus faible que les autres monnaies contemporaines, l'analyse des deniers de Venise frappés selon le Type 2 de Louis le Pieux révèle une signature particulière de l'argent qui les constitue au regard des teneurs en or et en bismuth. Ces deux éléments sont apparus par le passé comme des traces susceptibles de différencier des origines différentes de stocks d'argent<sup>550</sup>. Les teneurs caractéristiques en or et en bismuth dans les monnaies de Venise peuvent donc laisser penser que de l'argent d'une origine différente de celui utilisé dans les officines des cités qui faisaient partie intégrante de l'empire carolingien aurait été utilisé pour être monnayé dans cet atelier. La disposition des points correspondant aux pièces de Venise et ceux relatifs aux échantillons des autres ateliers fait penser à un mélange de deux stocks d'argent différents présentant d'une part des teneurs élevées en bismuth et basses en or, et d'autre part des concentrations fortes en or et faibles en bismuth.

Pour les monnaies de titre faible et dont les teneurs en bismuth sont relativement élevées, l'explication du rapprochement avec les exemplaires de Venise du point de vue de la composition est difficile à interpréter. Peut-on imaginer qu'un stock d'argent constitué majoritairement de monnaies vénitiennes ait été refondu dans les ateliers de Tours, Dax ou Pavie ? Ou bien les monnayeurs vénitiens se seraient-ils livrés à de la fabrication de contrefaçons au nom d'autres officines ? Aucune des deux hypothèses ne semble pleinement satisfaisante.

La tendance qui a été observée pour les monnaies du Type 2 de Louis le Pieux nous a incité à examiner spécifiquement les teneurs en or et en bismuth dans les exemplaires analysés du type suivant, au temple et à la légende chrétienne (822/3-840).

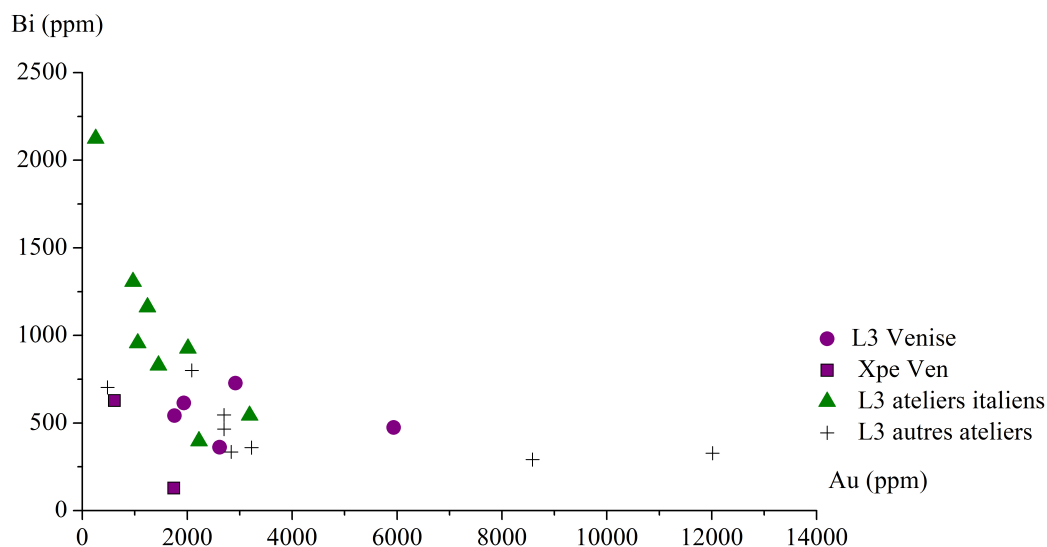
La Figure 165 représente les concentrations déterminées pour ces deux éléments dans les monnaies du Type 3 de Louis le Pieux attribuées à Venise, à l'Italie carolingienne (c'est-à-dire pour ce type le seul atelier de Milan) et aux autres ateliers étudiés (Orléans, Trèves, Melle, Dax et Dorestad). Les deux

---

<sup>549</sup> (Parvérie, 2008). Voir également (Moesgaard, 2008).

<sup>550</sup> Voir (Cowell et Lowick, 1988) et (McKerrell et Stevenson, 1972) pour l'utilisation conjointe de l'or et du bismuth pour la distinction de stocks d'argent d'origines différentes. Voir par exemple (Gordus *et al.*, 1974) pour l'or seul.

exemplaires vénitiens du Type *Xpe Salva Venecias*, dont la frappe est supposée contemporaine, sont également représentés sur cette figure.



**Figure 165** - Représentation des teneurs en bismuth en fonction des teneurs en or pour les monnaies du Type 3 de Louis le Pieux supposées avoir été frappées à Venise, en Italie carolingienne et dans le reste de l'empire, et pour celle du Type *Xpe Salva Venecias*.

Les monnaies attribuées à Venise pour le Type 3 de Louis le Pieux ne semblent pas présenter les mêmes caractéristiques que celles du type précédent du point de vue des teneurs en or et en bismuth. Pour les exemplaires analysés, les concentrations en bismuth sont relativement faibles en comparaison avec celles déterminées pour les monnaies vénitiennes du Type 2 de Louis le Pieux, immédiatement antérieur. Il en est de même pour les pièces supposées contemporaines du Type *Xpe Salva Venecias*. La Figure 165 semble montrer une tendance similaire pour les pièces du Type 3 de Louis le Pieux attribuées à Venise et pour celles qui seraient issues des ateliers carolingiens situés en dehors d'Italie. Pour cette période, la tendance d'un groupe de points à s'étirer vers des teneurs en bismuth élevées concerne les monnaies attribuées à Milan (Figure 165).

Les teneurs élevées en bismuth et faibles en or des monnaies vénitiennes semblent donc caractériser uniquement les pièces frappées durant les années 818-822/3, et s'arrêter par la suite. Si les tendances observées reflètent la réalité de la composition de l'argent utilisé pour la frappe monétaire à Venise, cela pourrait suggérer que l'origine du stock d'argent utilisé par l'atelier de cette ville durant ces années diffère de celle du métal précieux monnayé dans les officines carolingiennes d'Italie ou d'ailleurs. Pour le type suivant, les exemplaires vénitiens

ne semblent plus présenter les mêmes caractéristiques de teneurs en or et en bismuth.

Cette tendance, si elle peut être vérifiée à l'avenir par des analyses complémentaires, montre l'intérêt d'analyser les premières frappes d'un atelier à l'aide d'une méthode qui permet le dosage des éléments mineurs et traces : le commerce des vénitiens à travers la Méditerranée qui s'intensifie durant la seconde moitié du VIII<sup>e</sup> siècle a offert à la jeune cité des Doges une prospérité rapide et un rôle prépondérant d'intermédiaire commercial entre l'Occident Carolingien et l'Orient Arabe et Byzantin. Il est possible que des quantités importantes d'argent soient parvenues à Venise à travers ce commerce. Peut-être la signature spécifique de l'argent vénitien en or et en bismuth traduit-elle l'emploi, du moins pour partie, d'argent provenant d'Orient pour la frappe des premières monnaies vénitiennes connues.

Par la suite, la signature en éléments-traces de l'argent vénitien semble s'être estompée. Ce sont les monnaies attribuées à Milan qui, entre 822/3 et 840, tendent à former un groupe spécifique dont les teneurs en bismuth sont relativement élevées par rapport aux émissions contemporaines. Peut-être de l'argent arrivé à Venise par le commerce à longue distance a-t-il été utilisé comme moyen de paiement lors d'échange commerciaux à Milan, puis aurait été refondu et refrappé en monnaies carolingiennes par l'atelier de cette ville. Ou bien alors faudrait-il envisager une révision de la classification de Coupland des deniers du Type 3 de Louis le Pieux ? La lisibilité des différences de teneurs observées pour les monnaies du Type 3 de Louis le Pieux n'est pas suffisante pour que ces hypothèses puissent être validées. Des analyses complémentaires d'exemplaires de ce type ainsi qu'une étude numismatique attentive des échantillons, qui s'appuierait de manière critique sur la classification stylistique des deniers du Type 3 de Louis le Pieux proposée par Coupland, offriraient peut-être une meilleure compréhension de ce monnayage.

Nous avons vu le rôle commercial de première importance de Venise entre Orient et Occident à travers la Méditerranée à partir de la seconde moitié du VIII<sup>e</sup> siècle. Les trouvailles de monnaies arabes en Occident recensées par McCormick soulignent les liens entre les marchands vénitiens et l'Orient arabe<sup>551</sup>.

Si de l'argent en provenance du monde arabe est effectivement arrivé dans l'empire carolingien à travers Venise sous forme de dirhams, il ne peut avoir

---

<sup>551</sup> (McCormick, 2001) p. 379-384 et (McCormick, 2002) p. 200-209, en particulier p. 208 : « *Arab coins, both gold and silver, concentrate at the head of the lagoon, at Venice. [...] The hoards converge with the documents to depict an influx of Arab coins in the three or four decades on either side of the year 800.* ».

pénétré ce territoire sans avoir été refondu : la circulation des monnaies étrangères était en effet interdite à l'intérieur des frontières de l'empire et, en particulier pour les monnaies du Type 2 de Louis le Pieux, les trouvailles monétaires confirment que cette prohibition était très respectée<sup>552</sup>. Ce ne sont donc pas des pièces d'argent arabes du haut Moyen Age qu'il convient de chercher pour identifier cette éventuelle arrivée d'argent, mais plutôt un possible traceur chimique qui serait contenu dans l'argent arabe, mais dont le stock monétaire carolingien aurait été exempt<sup>553</sup>. Les teneurs élevées en bismuth détectées dans les monnaies vénitiennes pourraient en être les témoins.

L'importance de ces questions, et l'intérêt que pourrait avoir la confirmation d'une arrivée d'argent arabe en Occident à travers Venise autour de 800, nous a amené à approfondir la problématique de la signature chimique des pièces vénitiennes de Louis le Pieux, grâce à la mise en œuvre de moyens analytiques complémentaires.

### *c. Les analyses des rapports isotopiques du plomb*

En complément des analyses élémentaires par LA-ICP-MS, quelques analyses des rapports isotopiques du plomb ont été effectuées<sup>554</sup> afin de vérifier si la différenciation observée entre les monnaies de Venise du Type 2 de Louis le Pieux et celles des autres ateliers italiens peut être confirmée par cette approche.

Six analyses ont pu être effectuées : trois deniers de Venise (Prou 918, BnF 920c et BnF 1982-63), et trois deniers d'autres ateliers, dont un situé en dehors d'Italie (Prou 79 de Cologne, Prou 903 de Pavie et Prou 909 de Milan). Les points correspondant à des analyses antérieures effectuées sur des galènes provenant de Melle<sup>555</sup>, seule mine d'importance de l'empire carolingien identifiée à l'heure actuelle, ont été ajoutés pour comparaison sur la Figure 166.

La Figure 166 montre que les caractéristiques isotopiques des deniers de Venise analysés les différencient des autres échantillons. Les trois points correspondant aux exemplaires vénitiens analysés se regroupent en effet dans une zone spécifique de ce graphique, d'après leurs rapports  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  et  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  caractéristiques.

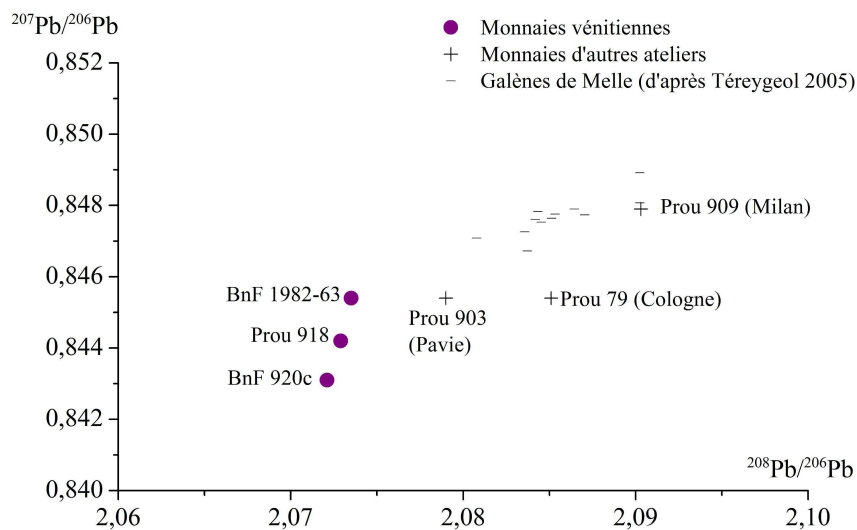
---

<sup>552</sup> (Coupland, 1990) p. 32-33. Voir en particulier le détail des trouvailles d'Apremont-Veuillin dans (Bompois, 1871) et de Belvézet dans (de Saulcy, 1837).

<sup>553</sup> (McCormick, 2001) p. 758.

<sup>554</sup> Sur l'utilisation de ce type de données pour les études de provenance en numismatique voir *supra* p. 399 et n. 513.

<sup>555</sup> D'après (Téreygeol *et al.*, 2005).



**Figure 166** - Représentation graphique des rapports isotopiques du plomb dans six deniers du Type 2 de Louis le Pieux: trois de Venise et trois d'autres ateliers. Les caractéristiques de galènes de la mine de Melle sont également reportées d'après (Téreygeol *et al.*, 2005).

Le denier de Pavie Prou 903, mis en évidence précédemment du fait de ses caractéristiques de titre d'argent ainsi que d'or et de bismuth, se place sur notre graphique entre les monnaies de Milan et Cologne, et celles de Venise. Le denier de Milan présente des caractéristiques isotopiques proches de celles des galènes de la mine de Melle ; cela ne signifie pas nécessairement que cet exemplaire a été frappé avec de l'argent provenant majoritairement du Poitou. En effet, des mélanges de stocks d'argent peuvent conduire à faire coïncider les signatures isotopiques de métaux d'origines géographiques différentes. Par contre, des signatures isotopiques différentes excluent que l'argent utilisé pour les deniers vénitiens soit uniquement ou majoritairement originaire de la mine Melle.

La comparaison de nos résultats avec ceux de la base de données de Stos-Gale *et al.* portant sur l'Italie<sup>556</sup> montre clairement que l'argent utilisé à Venise pour la frappe des deniers sous Louis le Pieux ne provient pas de mines italiennes. Les quelques résultats des analyses des rapports isotopiques du plomb obtenus pour les deniers carolingiens semblent confirmer les particularités des monnaies de Venise qui ressortent de l'étude du titre et de certains éléments mineurs et traces : du point de vue des isotopes du plomb, les deniers vénitiens présentent des caractéristiques différentes des autres monnaies analysées. De plus, la comparaison de ces résultats d'analyses isotopiques avec ceux présentés dans la base de données

<sup>556</sup> (Stos-Gale *et al.*, 1995). Les résultats de cette publication sont reportés graphiquement en Annexe 6 pour comparaison avec ceux des nôtres qui portent sur les pièces de Venise.

publiée dans *Archaeometry* concernant le bassin méditerranéen et les Iles Britanniques<sup>557</sup> est claire : les caractéristiques des monnaies de Venise sont particulières ; seules celles des districts de Mendips et Bristol (Somerset, Angleterre) s'en rapprochent. Comme nous l'avons déjà mentionné, cela ne signifie pas nécessairement que l'argent monnayé vénitien provienne majoritairement de cette zone ; une telle hypothèse semble peu probable. Il semble donc qu'il faille nous orienter vers des districts miniers qui ne sont pas référencés dans cette base de données. En Europe, des mines d'argent existent dans les Alpes et en Europe centrale, mais l'importance de leurs activités aux VIII<sup>e</sup> et IX<sup>e</sup> siècles n'est pas avérée, et reste à préciser<sup>558</sup>.

Les analyses des rapports isotopiques du plomb des deniers vénitiens du Type 2 de Louis le Pieux, malgré leur faible nombre, semblent donc confirmer la spécificité de l'argent qui les constitue. Les bases de données concernant l'Europe Occidentale et une partie du bassin méditerranéen sont insuffisantes pour identifier une signature isotopique proche de celle des monnaies de Venise. Un mélange de métaux issus des mines d'argent répertoriées n'est pas non plus envisageable tant les points correspondant à l'argent des deniers vénitiens sont éloignés des autres.

L'étude bibliographique des analyses antérieures ayant révélé des teneurs en bismuth élevées, ainsi que la connaissance du contexte historique et économique impliquant Venise durant le haut Moyen Age, incitent à orienter les recherches vers l'Orient arabe. La problématique de l'origine des l'argent vénitien pourrait s'inscrire dans une optique liée à la thèse de Pirenne.

#### *d. Des perspectives « piréniennes » ?*

Du point de vue de leur signature chimique, les premières monnaies connues frappées à Venise durant les années 818-822/3 présentent une caractéristique remarquable par rapport aux émissions carolingiennes contemporaines : leurs teneurs en bismuth sont particulièrement élevées. Des différences du point de vue de cet élément-trace sont particulièrement intéressantes car il s'agit d'un marqueur potentiel de l'origine de l'argent. Ses teneurs peuvent permettre de différencier des stocks de métaux précieux différents.

---

<sup>557</sup> (Stos-Gale *et al.*, 1996a ; Stos-Gale *et al.*, 1998 ; Stos-Gale *et al.*, 1996b ; Stos-Gale *et al.*, 1997). La comparaison de la signature des rapports isotopiques du plomb entre les deniers vénitiens analysés dans le cadre de cette thèse et les minerais publiés dans ces bases de données apparaît dans l'Annexe 6.

<sup>558</sup> Voir à ce sujet (Klappauf, 2003a) et (Klappauf, 2003b).

Au début du IX<sup>e</sup> siècle, Venise est le seul port d'importance qui offre une ouverture au territoire carolingien vers la Méditerranée et l'Orient. La combinaison de ces données analytiques et historiques nous a incité à approfondir l'étude d'une éventuelle arrivée d'argent dans la circulation monétaire carolingienne, à travers Venise et ses relations commerciales à longue distance.

L'intérêt de l'analyse de monnaies carolingiennes et arabes du haut Moyen Age, dans le but de mettre en évidence des déplacements de stocks d'argent entre Orient et Occident, a été suggéré par différents auteurs par le passé. Metcalf par exemple l'avait formulé ainsi, bien que la période qui se soit révélée intéressante ne soit pas précisément celle qu'il mentionne : « *A thorough analytical study of the trace elements in the silver of Charlemagne's early issues, and a comparison with the trace elements in miliaresia and dirhams of the period 750-90 will, in the writer's view, turn out to be most fruitful [...] at any rate in pilot studies.*<sup>559</sup> ». McCormick avait quant à lui pressenti l'apport que pourrait avoir la caractérisation des éléments-traces dans les monnaies de Venise : « *Analysis of silver from the mint of Venice may cast more light on its origin.*<sup>560</sup> ». La présence du bismuth dans les monnaies vénitiennes frappées selon le type carolingien autour de 820 pourrait donc être la trace d'une arrivée d'argent arabe dans la masse monétaire en circulation dans l'empire carolingien.

Les mentions de teneurs élevées en bismuth dans les publications traitant d'analyses de monnaies d'argent sont rares. Il est toutefois remarquable que toutes soient relatives à la caractérisation de monnaies arabes.

Les analyses de dirhams des Abbassides et des Samanides de la fin du IX<sup>e</sup> et du début du X<sup>e</sup> siècle publiées par Cowell et Lowick révèlent des teneurs en bismuth qui peuvent atteindre plusieurs pourcents<sup>561</sup>. Les concentrations en or sont de plus remarquablement basses dans les exemplaires analysés. Les dirhams au nom d'Andarab sont ceux qui présentent les teneurs en bismuth les plus élevées. Selon Hodges et Whitehouse, Andarab est la ville où était centralisé l'argent extrait du Panjir, principal gisement d'argent du Califat Abbasside<sup>562</sup>. D'Andarab, le métal blanc pouvait être transporté sous forme de lingots pour être frappé dans les ateliers de Balkh ou Nishapur, ou rejoindre la capitale du Califat par la route du Khorassan

---

<sup>559</sup> (Metcalf, 1972) p. 407.

<sup>560</sup> (McCormick, 2001) p. 758.

<sup>561</sup> (Cowell et Lowick, 1988) p. 74.

<sup>562</sup> (Hodges et Whitehouse, 1996) p. 125.



qui était alors « *celle par laquelle l'argent arrivait à Bagdad dans le trésor Abbasside.* »<sup>563</sup>. Allan mentionne des frappes au nom même de Panjir à partir de 871 ; des monnaies au nom d'une ville proche auraient toutefois été émises dès l'époque Omeyyade<sup>564</sup>.

D'autres chercheurs ont également fait mention de teneurs en bismuth très élevées dans des monnaies arabes du haut Moyen Age. Eniosova et Mitoyan rapportent des résultats d'analyses de dirhams des Samanides qui ont révélé des concentrations en bismuth de plusieurs pourcents<sup>565</sup>. L'origine des exemplaires analysés ne les relie pas cette fois aux mines d'argent du Panjir, mais à la Transoxiane. Cette autre région, sous domination arabe à cette époque, recèle d'importants gisements de minerai argentifère. Hodges et Whitehouse mentionnent les mines d'Ilaq, localisées dans cette province, qui selon eux « *rivalisèrent presque avec celles de la vallée du Panjir.* »<sup>566</sup>. Le district minier d'Ilaq est cité lui aussi par Allan comme l'une des trois zones importantes d'extraction de l'argent en Transoxiane d'après les géographes arabes du X<sup>e</sup> siècle<sup>567</sup>. Ce même auteur rapporte en outre que l'argent de ces mines aurait été centralisé à Boukhara<sup>568</sup>.

Les deux principaux gisements d'argent du Califat Abbasside semblent donc être caractérisés par des teneurs en bismuth élevées, qui permettent de différencier les monnaies frappés par les ateliers les plus proches de celles issues d'officines plus éloignées.

Une dernière étude renforce encore le lien qui semble se dessiner entre le bismuth et l'argent arabe. Il s'agit dans ce cas d'analyses de monnaies d'argent anglo-saxonnes et arabes du X<sup>e</sup> siècle retrouvées en Ecosse<sup>569</sup>. La représentation des teneurs en or en fonction des teneurs en bismuth déterminées dans les échantillons étudiés montre que, durant la première moitié du IX<sup>e</sup> siècle, deux groupes se distinguent : d'un côté, les monnaies anglo-saxonnes, plus riches en or mais contenant peu de bismuth ; de l'autre, les pièces orientales – pour l'essentiel des dirhams samanides –, avec moins d'or et davantage de bismuth. Cette étude présente une similarité singulière avec nos résultats, bien que la démarche soit inverse de la nôtre : deux stocks d'argent contemporains d'origine connue ont été analysés par McKerrell et Stevenson ; les résultats ont démontré que ces deux stocks monétaires sont caractérisés par des teneurs en or et bismuth spécifiques.

---

<sup>563</sup> (Hodges et Whitehouse, 1996) p. 125.

<sup>564</sup> (Allan, 1979) p. 14.

<sup>565</sup> (Eniosova et Mitoyan, 2008).

<sup>566</sup> (Hodges et Whitehouse, 1996) p. 125.

<sup>567</sup> (Allan, 1979) p. 13.

<sup>568</sup> (Allan, 1979) p. 15.

<sup>569</sup> (McKerrell et Stevenson, 1972). Voir en particulier la Figure 4 p. 202.

Les différences d'origine des monnaies sont donc corrélées avec des variations des teneurs de ces deux éléments-traces, qui pour cette problématique peuvent servir de marqueurs. Dans notre cas, ce sont les résultats d'analyses pratiquées sur des monnaies que l'étude numismatique n'avait pas différenciées qui ont mis en évidence deux groupes distincts sur la base des teneurs de ces deux mêmes éléments. Il pourrait donc s'agir de deux stocks d'argent différents, dont l'un, celui constituant les deniers vénitiens, proviendrait de l'extérieur de l'empire carolingien. Cet argent est-il, comme dans le cas des monnaies mises au jour en Ecosse, en provenance du monde arabe ? Les résultats présentés dans les paragraphes précédents le suggèrent, et l'étude du contexte historique et économique abonde également dans ce sens.

C'est donc vers une étude préliminaire de monnaies Arabes du haut Moyen Age qu'il convient de s'orienter afin d'estimer la pertinence de ces hypothèses.

#### *e. Les analyses de monnaies arabes*

##### *i - La sélection des échantillons*

Les analyses de dirhams arabes ne portent que sur un échantillonnage restreint, au contraire des monnaies carolingiennes étudiées dans le cadre de cette thèse. Il convient donc de choisir ces pièces avec soin<sup>570</sup>. Deux approches ont été adoptées pour sélectionner les monnaies arabes qui ont fait l'objet d'analyses élémentaires par LA-ICP-MS. Le choix des exemplaires s'est fait à partir des données historiques, numismatiques et analytiques disponibles, dans le but de contribuer à la compréhension des relations entre les mondes chrétien et musulman au début du IX<sup>e</sup> siècle.

La première approche s'appuie sur les trouvailles de pièces arabes du haut Moyen Age en Occident, recensées par McCormick<sup>571</sup>. Des monnaies d'or, d'argent et de cuivre, d'origine Arabe et datées du VI<sup>e</sup> au X<sup>e</sup> siècle, ont été retrouvées en Europe Occidentale. Le monométallisme argent en vigueur sous les Carolingiens impose de se focaliser sur les dirhams, et d'exclure les pièces d'un autre métal que l'argent. Le choix des exemplaires précis s'est ensuite basé sur le lieu de trouvaille, la période d'émission et la disponibilité dans la collection de monnaies arabes du haut Moyen Age de la BnF.

---

<sup>570</sup> Un catalogue simplifié des monnaies arabes analysées est présenté en Annexe 7.

<sup>571</sup> Voir (McCormick, 2001), Appendice 3 p. 815-851

D'après l'étude des trouvailles de monnaies d'argent arabes du haut Moyen Age en Occident, seize pièces d'argent, abbassides principalement mais également omeyyades, dont la période d'émission s'étend de 710/1 à 895/6 AD<sup>572</sup> (92 à 292 AH), ont ainsi été choisies pour faire l'objet d'analyses. Quatre autres dirhams ont été ajoutés pour inclure les ateliers les plus productifs dans ce premier groupe d'échantillons.

La seconde approche a consisté à sélectionner des dirhams dont l'atelier de frappe est susceptible d'avoir été lié à un district minier connu pour avoir été actif à la fin du VIII<sup>e</sup> ou au début du IX<sup>e</sup> siècle. Les informations rassemblées par Hodges et Whitehouse sur ce point sont particulièrement précieuses : ces auteurs rapportent que les deux zones de production d'argent les plus importantes du Califat Abbasside étaient le Panjir, dans le Khorassan Oriental (nord-est de l'Iran), et Ilaq en Transoxiane, dans l'Ouzbékistan actuel<sup>573</sup>. L'argent du Panjir aurait été centralisé à Andarab<sup>574</sup> ; les monnaies de ce nom sont plus tardives que la période qui nous intéresse, elles n'ont donc pas été sélectionnées.

Parmi les ateliers connus pour la fin du VIII<sup>e</sup> et le début du IX<sup>e</sup> siècle, le plus proche de la région du Panjir et d'Andarab est Balkh<sup>575</sup>. Cinq monnaies de cet atelier ont été choisies. Pour Ilaq, les villes les plus proches dont les noms apparaissent sur des monnaies de cette période sont Samarqand, Boukhara et Shash, toutes en actuel Ouzbékistan. Cinq dirhams de Boukhara, deux de Shash et de Samarqand ont été choisis pour être analysés. Les travaux de Noonan effectués à partir des nombreux trésors de monnaies arabes confirment le rôle prépondérant des ateliers monétaires de Balkh et de Shash autour de 800<sup>576</sup>. Quelques exemplaires de la capitale Madinat al Salam, actuelle Bagdad, et d'autres villes ou provinces importantes (El Mohammediyah, Al Basra et Ifriqiya) ont également été inclus pour comparaison, portant le total pour ce groupe à vingt échantillons.

Les années choisies pour ce groupe sont comprises entre 790 et 810 (174-194 AH), soit légèrement antérieures à celles de l'émission des deniers du Type 2

---

<sup>572</sup> Bien que les années d'émission qui apparaissent sur les dirhams abbassides et omeyyades soit exprimées selon le calendrier musulman de l'Hégire (années AH), il a été jugé préférable de présenter les dates converties selon le calendrier grégorien (années A.D.) afin de faciliter la comparaison avec les périodes d'émission des deniers et oboles carolingiens.

<sup>573</sup> (Hodges et Whitehouse, 1996) p. 125. Voir également (Allan, 1979) p. 13-17 et (Bolin, 1953) p. 22.

<sup>574</sup> (Hodges et Whitehouse, 1996) p. 125.

<sup>575</sup> Les ateliers monétaires arabes cités sont localisés sur la carte présentée en Figure 167, sauf celui de Beda'a qui n'a pas pu être identifié. Pour les noms qui correspondent à des provinces, la ville principale est assimilée au lieu d'émission des pièces.

<sup>576</sup> (Noonan, 1986) p. 152. L'importance des gisements argentifères du Khorassan et de Transoxiane est donc également mise en évidence par l'étude numismatique.

de Louis le Pieux, et donc aux monnaies vénitiennes dont la teneur élevée en bismuth a suggéré la possibilité de la présence d'argent d'origine arabe. Elles correspondent au califat d'Haroun al Rashid (786-809) essentiellement, ainsi qu'à celui d'Al-Amîn (809-813) dans une mesure moindre.

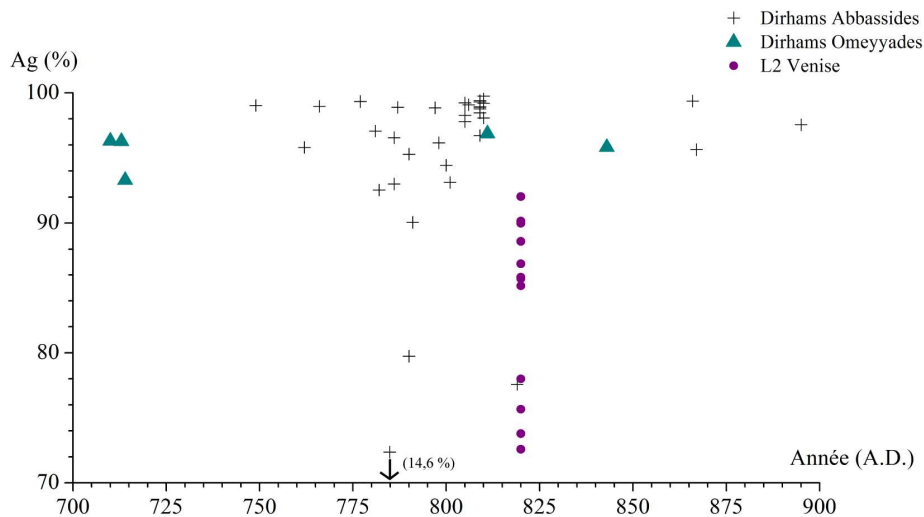


**Figure 167** - Carte des lieux d'émission arabes cités. D'après (Gyselen et Nègre, 1982) p. 204-205.

*ii - Le titre d'argent*

L'étude du titre d'argent des monnaies ne présente pas d'intérêt pour déterminer la provenance du métal utilisé. Pour la problématique qui nous intéresse ici, l'examen de la pureté de l'ensemble des dirhams abbassides et omeyyades analysés apporte toutefois une information importante.

La Figure 168 représente les titres d'argent de l'ensemble des dirhams arabes analysés, quelle qu'en ait été la méthode de sélection, et compare leur pureté à celle des deniers vénitiens du Type 2 de Louis le Pieux.



**Figure 168** - Représentation graphique du titre des dirhams omeyyades et abbassides et des deniers vénitiens du Type 2 de Louis le Pieux en fonction de leur année d'émission.

La majorité des exemplaires frappés durant les quelques décennies antérieures à l'émission des monnaies du Type 2 de Louis le Pieux, et donc des deniers vénitiens riches en bismuth, contient plus de 90 % d'argent (Figure 168<sup>577</sup>). Seuls deux d'entre eux présentent des titres inférieurs à 80 %, très légèrement pour l'un et très largement pour l'autre.

Les monnaies de Venise du Type 2 de Louis le Pieux contiennent en moyenne 83,7 % d'argent, et le titre de seulement deux des douze deniers analysés est supérieur à 90 % (Figure 168). Les pièces vénitiennes de cette période sont donc moins pures que les dirhams abbassides des années antérieures.

La faiblesse relative du titre des deniers de Venise du Type 2 de Louis le Pieux par rapport aux émissions carolingiennes contemporaines ne peut donc pas s'expliquer par la refonte de monnaies arabes d'un titre équivalent. Si réellement de l'argent constituant initialement des dirhams a été utilisé pour en faire des deniers de type carolingien à Venise, soit il leur a été ajouté du cuivre pour les affaiblir, soit un autre monnayage de pureté moindre leur a été mélangé.

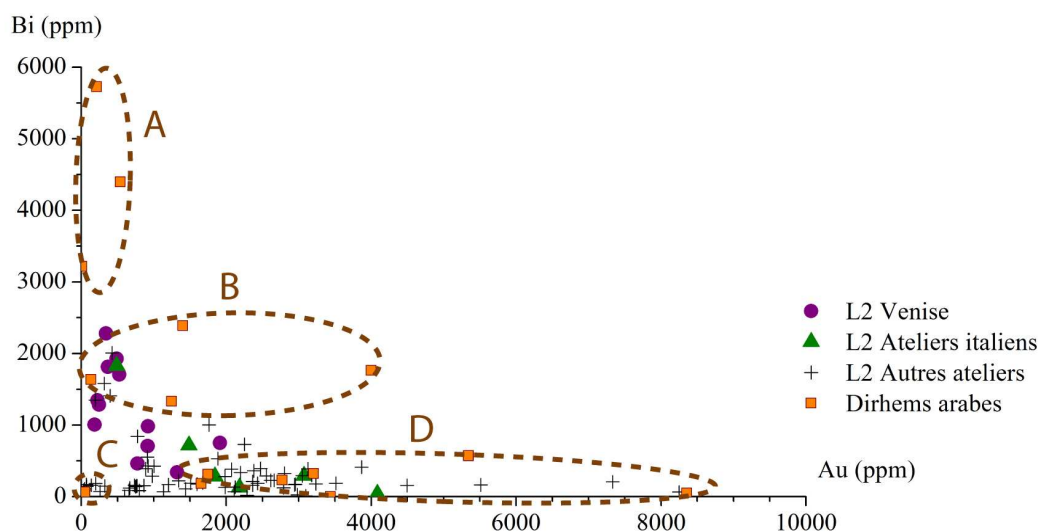
### *iii - Les éléments mineurs et traces*

Les résultats obtenus pour les monnaies sélectionnées d'après les trouvailles recensées par McCormick et pour celles choisies d'après la connaissance de l'activité minière du Califat Abbasside ont été dissociés pour l'interprétation des éléments mineurs et traces. Dans les deux cas, ce sont l'or et le bismuth qui ont été particulièrement étudiés.

La Figure 169 représente les teneurs en bismuth en fonction des teneurs en or pour les dirhams arabes du haut Moyen Age sélectionnés d'après les trouvailles de telles monnaies en Occident. Les points correspondant aux deniers carolingiens du Type 2 de Louis le Pieux sont également reportés ; les exemplaires vénitiens, italiens et des autres ateliers y sont différenciés.

---

<sup>577</sup> Les points correspondant aux deniers du Type 2 de Louis le Pieux qui apparaissent sur la Figure 168 ont été centrés sur l'année 820 en abscisse pour faciliter la lecture du graphique, bien que leur frappe ait duré de 818 à 822/3.



**Figure 169** - Représentation graphique des teneurs en bismuth en fonction des teneurs en or pour les dirhams arabes sélectionnés d'après l'étude des trouvailles des pièces de ce type en Occident, ainsi que des deniers du Type 2 de Louis le Pieux de Venise, d'Italie et du reste du territoire carolingien.

L'étude des teneurs en or et en bismuth dans les dirhams similaires à ceux retrouvés en Occident a révélé des tendances intéressantes (Figure 169). Les deux monnaies les plus riches en bismuth (entre 4000 et 6000 ppm) sont au nom d'Al Andalus. Il ne s'agit donc pas d'émissions abbassides, mais de frappes de l'Espagne Omeyyade. Leurs teneurs en or sont de plus particulièrement faibles. Un autre échantillon, celui-ci de Samarqand (Ouzbékistan), et donc Abbasside, présente également une teneur en bismuth élevée et une concentration en or très faible. Ces trois monnaies forment un groupe qui se différencie des autres sur le diagramme représentant les teneurs en bismuth en fonction des teneurs en or (Groupe A). Les concentrations en bismuth de ces trois échantillons sont comprises entre 3000 ppm et 6000 ppm. Elles contiennent donc davantage de cet élément que la plus riche des vénitiennes analysées, dont la teneur en bismuth est de « seulement » 2280 ppm.

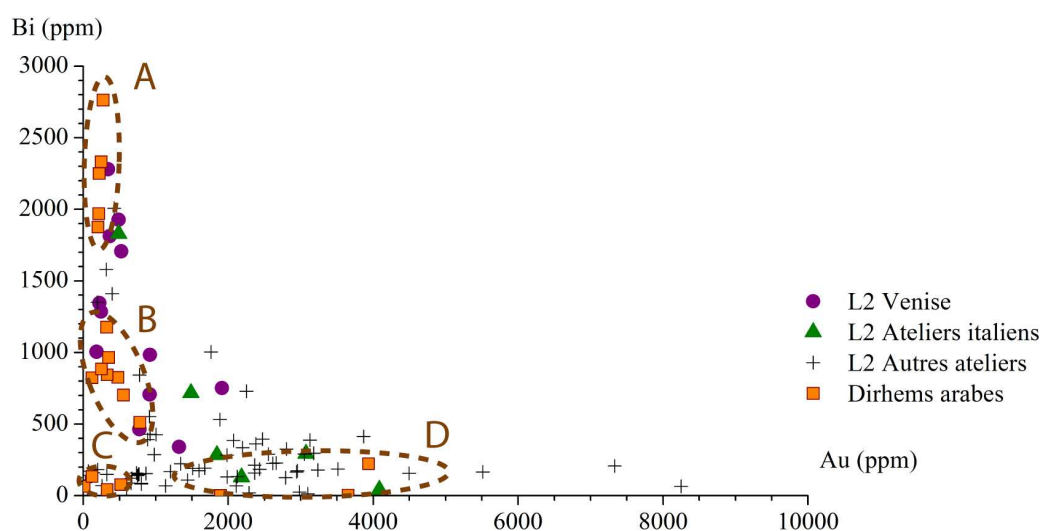
Un second groupe peut être distingué sur la Figure 169 : il s'agit du Groupe B, qui rassemble des monnaies dont les teneurs en bismuth sont non négligeables mais inférieures à celles des échantillons du Groupe A. Leurs concentrations en or sont variables, contrairement à celles des pièces du groupe précédent. Les dirhams qui forment le Groupe B proviennent d'ateliers divers : Al Tayrama, Arminiya (province d'Arménie), Al Muhammadiyah (ou Rayy, près de Téhéran, Iran) et Al Basra (Iraq).

Un troisième groupe est constitué de cinq monnaies dont les teneurs en bismuth et en or sont très faibles (Groupe C sur la Figure 169). Ces échantillons

contiennent tous à l'exception d'un moins de 10 ppm de ces deux éléments. Trois sont au nom d'Al Abbasiya et un d'Ifriqiya, en Afrique du nord, et un de Beda'a .

Le Groupe D présenté sur la Figure 169 rassemble les dirhams analysés qui contiennent très peu de bismuth, et des teneurs en or variables et non négligeables. Les sept échantillons concernés proviennent de Madinat al Salam pour deux d'entre eux, et d'Ifriqiya, Dimashq, Isfahan, Istakhr et Kufa.

Les dirhams analysés sélectionnés d'après les informations disponibles concernant l'activité minière dans le califat Abbasside présentent également des teneurs en bismuth et en or qui permettent d'effectuer des regroupements (Figure 170).



**Figure 170** - Représentation des teneurs en bismuth en fonction des teneurs en or pour les dirhams arabes sélectionnés d'après la connaissance de l'activité minière dans le Califat Abbasside, ainsi que des monnaies du Type 2 de Louis le Pieux de Venise, d'Italie et du reste du territoire carolingien.

Le Groupe A sur la Figure 170 est composé des dirhams dont les teneurs en or sont très faibles, et celles en bismuth plus élevées que les autres. Leur « signature » du point de vue des concentrations de ces deux éléments est similaire à celle des monnaies de Venise les plus riches en bismuth. Cinq dirhams abbassides forment le Groupe A. Trois sont issus de l'atelier de Boukhara, et deux de celui de Samarqand. Ces deux villes sont situées en Asie Centrale, dans l'actuel Ouzbékistan.

Les monnaies arabes qui présentent des teneurs en bismuth non négligeables et des teneurs en or relativement faibles forment le Groupe B sur la Figure 170. Leurs concentrations pour ces deux éléments les rapprochent de

certaines des monnaies vénitiennes du Type 2 de Louis le Pieux. Parmi les huit dirhams du Groupe B, quatre sont au nom de Balkh, deux de Boukhara, un de Sijistan et un de Shash. Balkh est le nom de l'ancienne Bactres, capitale de la Bactriane qui s'étendait sur l'Afghanistan, l'Ouzbékistan et le Tadjikistan actuels. Sijistan correspond au nom de la ville moderne de Zarandj, en Afghanistan. Shash, actuel Tashkent, est comme Boukahra situé en Ouzbékistan moderne.

Les noms des ateliers émetteurs des dirhams formant les Groupes A et B sont ceux de villes ou de provinces qui se situent dans une même zone du Califat Abbasside. L'Ouzbékistan moderne est le plus représenté, ainsi que le nord de l'Afghanistan et le Tadjikistan.

Le Groupe C distingué sur la Figure 170 rassemble les pièces dont les teneurs des deux éléments discriminants, l'or et le bismuth, sont particulièrement faibles. Quatre échantillons sont concernés. On retrouve parmi eux deux exemplaires issus d'ateliers déjà représentés dans le Groupe B (Shash et Balkh), ainsi qu'un d'Ifriqiya (Afrique du Nord), et un de Al Muhammadiyah.

Les dirhams qui forment le Groupe D sur la Figure 170 contiennent peu de bismuth et présentent des teneurs en or relativement importantes. Deux des échantillons concernés proviennent d'Al Basra (actuellement Bassorah, Iraq) et le troisième de Shash, dont des exemplaires de la même origine sont également contenus dans les Groupes B et C.

Qu'il s'agisse des échantillons choisis d'après les trouvailles en Occident ou d'après la connaissance de l'exploitation minière dans le califat Abbasside au IX<sup>e</sup> siècle, l'examen des teneurs en or et en bismuth des dirhams analysés montre pour certains d'entre eux des similitudes avec les deniers vénitiens du Type 2 de Louis le Pieux. Les ateliers les plus intéressants semblent être ceux de Boukhara et de Samarqand. Ces deux villes étaient situées sur la « route du Khorassan » qui était « *celle par laquelle l'argent arrivait à Bagdad dans le trésor abbasside.*<sup>578</sup> ». Les dirhams d'Espagne Omeyyade au nom d'Al Andalus présentent également une signature en éléments-traces caractéristiques qui rappelle celle de l'argent vénitien.

Afin d'aller plus avant dans la comparaison, certains des dirhams dont la composition élémentaire a été caractérisée par LA-ICP-MS ont été soumis à une analyse des rapports isotopiques du plomb.

---

<sup>578</sup> (Hodges et Whitehouse, 1996) p. 125.



#### *iv - Les rapports isotopiques du plomb*

Les rapports d'abondance entre les différents isotopes naturels du plomb peuvent permettre de distinguer des sources d'approvisionnement en métal précieux différentes, ou au contraire suggérer une même origine du minerai utilisé. Cette seule approche, comme le dosage d'éléments-traces caractéristiques, n'est pas suffisante pour pouvoir affirmer que des échantillons dont la signature chimique est identique ont une origine commune ; la combinaison des deux, sous réserve que l'étude historique, numismatique et économique ne les contredise pas, constitue cependant une base solide pour formuler des hypothèses.

Dix des dirhams dont la composition élémentaire a été déterminée par LA-ICP-MS ont fait l'objet d'une caractérisation des rapports isotopiques du plomb<sup>579</sup>. Le choix des échantillons s'est porté sur des monnaies sélectionnées en vue de leur analyse élémentaire sur la base des connaissances sur la production d'argent dans le Califat Abbasside exclusivement, et non à partir des trouvailles d'exemplaires en Occident : il s'agit pour les analyses des rapports isotopiques du plomb de déterminer si des signatures différentes apparaissent entre des monnaies qui pourraient avoir été reliées à l'une des principales zones d'activité minière du monde Arabe.

Les exemplaires issus d'ateliers dont il peut être légitimement supposé qu'ils furent approvisionnés au moins partiellement par les gisements d'argent du Panjir d'une part et de Transoxiane d'autre part ont été privilégiés. Les différences de teneurs en or et en bismuth ont également été prises en compte.

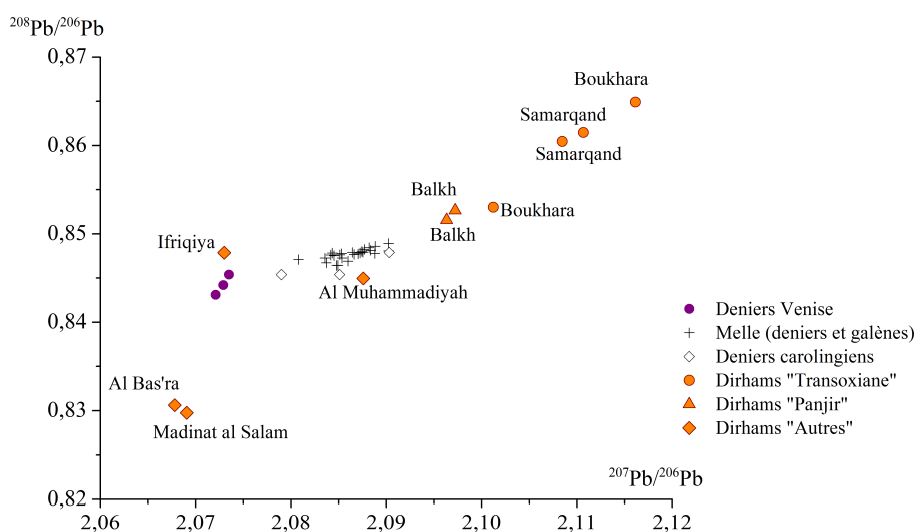
Deux dirhams frappés à Samarqand (Lavoix 803 et BnF 1965-171) et deux de Boukhara (Lavoix 778 et BnF 1970-335), dont le lien avec les gisements d'Asie Centrale est supposé, ont été inclus dans le *corpus* des monnaies arabes dont les rapports isotopiques du plomb ont été déterminés. Deux exemplaires de Balkh (Lavoix 781 et Lavoix 787), situé dans la région du Panjir, ont été ajoutés. Des pièces aux noms de Madinat al Salam (Lavoix 861), Al Bas'ra (Lavoix 779), Ifriqiya (Lavoix 777) et Al Muhammadiyah (Lavoix 859) ont été inclus pour comparaison.

La Figure 171 présente la comparaison entre les signatures des rapports isotopiques du plomb des dirhams arabes, des monnaies carolingiennes et

---

<sup>579</sup> Les analyses des rapports isotopiques du plomb dans les monnaies arabes ont été effectuées à notre demande par C. Guerrot du BRGM d'Orléans. Voir *supra* p. 399 et n. 513. Les résultats complets de ces analyses apparaissent en Annexe 5.

vénitiennes du Type 2 de Louis le Pieux, et de galènes extraites des mines d'argent de Melle.



**Figure 171** - Représentation graphique des rapports isotopiques du plomb dans les monnaies arabes. Comparaison avec les deniers vénitiens et carolingiens, ainsi qu'avec les monnaies de Melle et les galènes de cette mine d'après (Téreygeol *et al.*, 2005) p. 50.

La comparaison des signatures isotopiques du plomb dans les deniers de Venise et dans les dirhams arabes ne confirme pas les similarités observées pour certains échantillons d'après l'étude des teneurs en or et en bismuth.

Du point de vue isotopique, les monnaies qui pourraient être constituées d'argent issu de mines situées dans des régions du monde arabe supposées avoir été particulièrement actives présentent des signatures incompatibles avec celles des deniers vénitiens. Les rapports des isotopes du plomb des alliages constituant les dirhams aux noms de Balkh, Boukhara et Samarqand sont à l'opposé de ceux déterminés pour les pièces de Venise. D'après ces résultats, la signature spécifique de ces dernières monnaies ne peut pas non plus s'expliquer par un mélange d'argent carolingien partiellement mellois avec du métal en provenance des mines de Transoxiane ou du Panjir. Une telle hypothèse n'est pas non plus recevable pour les dirhams aux noms de Al Muhammadiyah, Madinat al Salam et Al Basra. Le seul échantillon arabe analysé dont la signature des rapports isotopiques du plomb se rapproche de celle des deniers vénitiens est celui au nom de la province d'Afrique du nord d'Ifriqiya. Le placement des points correspondant aux deniers vénitiens sur la Figure 171 pourrait suggérer un mélange d'argent dont la signature serait identique à celle définie pour les échantillons de Madinat al Salam et Al Basra, avec dans des proportions plus importantes du métal présentant les mêmes caractéristiques que celui constituant le dirham d'Ifriqiya analysé.

Il ne s'agit toutefois que de conjectures : le caractère non exclusif de la signature d'un alliage d'après le dosage des rapports isotopiques du plomb, et plus encore le nombre restreint d'analyses de ce type pour les monnaies carolingiennes et vénitiennes comme pour les dirhams arabes contemporains, apportent tout au plus des données indicatives.

#### *f. Encore Pirene*

La problématique de l'origine de l'argent carolingien semble, du moins pour partie, impliquer Venise. La documentation historique, les données archéologiques et l'étude numismatique convergent pour dépeindre un rôle prépondérant de Venise entre Orient et Occident autour de 800. Les données analytiques, bien que leur interprétation semble complexe, contribuent à mettre en évidence le dynamisme commercial vénitien au début du IX<sup>e</sup> siècle.

Le titre d'argent distingue indiscutablement Venise des autres ateliers ayant frappé des monnaies sous Louis le Pieux. Ce résultat amène de nombreuses interrogations dont les réponses sont encore incertaines. Il s'agit principalement des conditions de la fabrication monétaire à Venise à partir de 818 : après avoir tenté de s'emparer de la cité lacustre au détriment des Byzantins au début du IX<sup>e</sup> siècle, l'accord conclu entre Charlemagne et Michel I<sup>er</sup> en 812 semble marquer la fin des tentatives carolingiennes pour contrôler Venise, et s'offrir ainsi une ouverture méditerranéenne active. Les relations diplomatiques entre Carolingiens et Vénitiens sont inconnues avant 840 ; il n'est donc pas possible de déterminer si Louis le Pieux a accordé le droit de frapper des monnaies similaires aux siennes à une cité sous une autre domination. La mention du nom de Venise sur les monnaies du Type 2 de Louis le Pieux, qui indiscutablement étaient inclus dans la circulation monétaire carolingienne, abonderait plutôt vers un traité conclu dans ce sens. N'oublions pas toutefois que le principal trait des Vénitiens autour de 800 dans le domaine économique est l'audace. La frappe de monnaies à Venise selon le Type 2 de Louis le Pieux pourrait donc être une initiative unilatérale des dirigeants vénitiens : leurs deniers, similaires à ceux qui circulaient dans la vallée du Pô et au-delà, pouvaient être acceptés pour les transactions dans ces régions. Selon cette hypothèse, l'autorité carolingienne aurait vraisemblablement été impuissante à contraindre les monnayeurs de Venise à cesser cette activité, et sans doute également à éliminer les nombreuses monnaies vénitiennes du numéraire en circulation.

Tandis que les différences de pureté entre les monnaies vénitiennes de Louis le Pieux et celles des autres ateliers attirent l'attention vers les relations entre

Venise et son voisin carolingien, c'est vers l'Orient que nous orientent les caractéristiques des éléments-traces et des rapports isotopiques du plomb. Les particularités des teneurs des deux traceurs potentiels de l'argent que sont l'or et le bismuth, ainsi que celles qui ressortent de l'examen des signatures isotopiques, sont des indices tangibles qui justifient d'axer les problématiques de recherche autour du rôle d'intermédiaire commercial de Venise à travers la Méditerranée durant le haut Moyen Age. Des questions essentielles pour la compréhension de cette période se trouvent ainsi soulevées : la reprise sensible d'un commerce maritime à grande échelle, la nature des biens échangés et le volume de ces échanges, ou leurs implications dans les économies respectives des parties concernées, sont autant de questions qui ont alimenté le débat sur la thèse de Pirenne.

Depuis la mort de l'historien belge en 1935, des études nombreuses appuyées par des données de plusieurs types ont supporté des hypothèses divergentes. Certaines des propositions de Pirenne ont depuis été revues ou nuancées, et des données nouvelles, en particulier grâce à l'archéologie, ont permis de préciser certaines incertitudes. Il n'en demeure pas moins que « *Mahomet et Charlemagne* » est une recherche fondatrice, et l'accumulation de preuves a donné raison à Pirenne quant à l'implication de Venise dans la reprise du commerce trans-méditerranéen et au caractère aussi inattendu qu'exponentiel de son premier essor durant la seconde moitié du VIII<sup>e</sup> siècle : « *De tous les prolongements byzantins vers l'ouest, le plus important et le plus original, c'est l'extraordinaire Venise, la plus curieuse réussite de l'histoire économique de tous les temps avec celle des Provinces-Unies.*<sup>580</sup> ». Les synthèses les plus récentes de Hodges et Whitehouse<sup>581</sup> et de McCormick<sup>582</sup> rassemblent des données de types divers qui s'accordent pour identifier Venise comme le centre névralgique du commerce maritime entre Orient et Occident durant ces années.

Malgré la complexité de leur interprétation, et des incohérences entre les signatures élémentaires et isotopiques entre les monnaies vénitiennes et arabes, des données encourageantes ressortent de l'étude préliminaire des dirhams du haut Moyen Age. De la même manière que l'entreprise d'un programme de recherche de grande ampleur a porté ses fruits pour la différenciation de l'argent carolingien de celui monnayé à Venise, ce n'est qu'une campagne d'une même importance qui permettrait d'identifier des différences ou des similarités avec l'argent arabe.

---

<sup>580</sup> (Pirenne *et al.*, 1992) p. 129

<sup>581</sup> (Hodges et Whitehouse, 1996).

<sup>582</sup> (McCormick, 2001).

Les territoires des Califats Abbasside et Omeyyade sont en effet extrêmement étendus ; un nombre d'ateliers monétaires important a été actif durant la période qui nous intéresse, et leur éloignement géographique justifie l'hypothèse de sources d'approvisionnement différentes. Des questions comme celle de la durée du parcours d'une monnaie d'un bord de la Méditerranée à l'autre conditionnent les années d'émission des exemplaires arabes qui doivent être choisis, afin d'y déceler une similitude avec les deniers vénitiens de 820 environ. Des données géochimiques qui n'ont pas été étudiées en profondeur ici doivent également être prises en compte : une recherche complète sur le monnayage d'argent arabe frappé autour de 800 impose d'étudier la constance ou la variabilité des signatures élémentaires et isotopiques des émissions d'un même atelier monétaire. Certains gisements comme celui de Shash ont fait l'objet de campagnes de fouilles archéologiques d'envergure<sup>583</sup>, et des minerais pourraient donc faire l'objet d'analyses pour une comparaison avec les monnaies issues des ateliers les plus proches.

C'est donc un programme d'analyse d'envergure que mérite le monnayage arabe du début du IX<sup>e</sup> siècle, incluant caractérisation élémentaire et isotopique de dirhams de l'ensemble du monde arabe et des gisements d'argent associés. Au-delà de l'implication de Venise et de son rôle d'intermédiaire avec les Carolingiens dont il a été discuté plus haut, d'autres problématiques d'un intérêt majeur se dégagent d'une telle étude.

Dans le domaine des relations commerciales à longue distance, les trouvailles de monnaies arabes depuis la Caspienne jusqu'à la Baltique en descendant la Volga mettent en évidence une route importante qui semble se mettre en place au début du IX<sup>e</sup> siècle, sous l'impulsion de marchands Scandinaves<sup>584</sup>. Orient Arabe et Occident Chrétien se retrouveraient donc impliqués dans un réseau d'échanges à grande échelle par une voie terrestre et fluviale à travers la Russie. De manière complémentaire à des études basées sur d'autres types de données, comme celles de Noonan<sup>585</sup> qui se focalisent sur les trouvailles monétaires du monde Arabe et de l'« Arc Nordique », l'analyse d'exemplaires de ces trésors pourrait par exemple être révélatrice de l'importance relative des gisements pour des périodes précises. La circulation de l'argent au sein du monde arabe et l'approvisionnement des ateliers monétaires pourrait être étudiée à travers d'éventuelles signatures chimiques. L'existence de marqueurs spécifiques de l'argent arabe devra être démontrée, bien que de fortes présomptions entourent le bismuth, et des signatures

---

<sup>583</sup> (Burjakov, 2007).

<sup>584</sup> (Hodges et Whitehouse, 1996) p. 117-123.

<sup>585</sup> Voir en particulier (Noonan, 1986), (Noonan, 1982) et (Noonan, 1998).

isotopiques différenciées potentielles devront être mises en évidence. L'expérience de l'analyse des monnaies carolingiennes fait appréhender une telle étude avec confiance et en encourage l'entreprise.

## **H. Bilan de l'analyse des monnaies carolingiennes et perspectives**

D'un point de vue purement comptable, le bilan de cette seconde partie dédiée à l'analyse de monnaies d'argent des premiers souverains Carolingiens peut être exprimé ainsi : plus de quatre cents monnaies frappées autour de 800 ont été soumises à notre protocole d'analyse par LA-ICP-MS, ainsi que quarante dirhams arabes contemporains ; trente-deux caractérisations des rapports isotopiques du plomb, bien que réalisées par un tiers, s'y ajoutent. Ce n'est toutefois pas la seule masse des données analytiques qui, dans les études physico-chimiques appliquées à des problématiques numismatiques, conditionne le nombre de pistes qui peuvent être explorées et les prolongements historiques qui leurs sont liées.

Dans le cadre d'une étude incluant la caractérisation de la composition chimique d'alliages monétaires, l'emploi d'une technique adaptée est certes indispensable pour mettre en évidence des différences de composition desquelles une interprétation historique pourra être proposée. L'application de la méthode LA-ICP-MS aux monnaies anciennes à base d'argent a été développée sur la base des pièces carolingiennes. Cette méthode constitue à l'heure actuelle la meilleure approche pour ce type d'échantillons en termes de fiabilité des résultats. Ce sont toutefois les caractéristiques intrinsèques des monnaies qui conditionnent la réussite de telles entreprises. Seule la mise en œuvre d'un programme de recherche adapté et réfléchi peut enfin permettre d'identifier des éventuelles différences et de proposer des hypothèses valides.

La période couverte par les années d'émissions des monnaies carolingiennes de notre *corpus* s'étend sur plus de cent années, depuis l'accession au trône du royaume Franc par Pépin le Bref en 751, à la proclamation de l'édit de Pîtres par son arrière-petit-fils Charles le Chauve en 864. Les lieux d'émission des exemplaires étudiés recouvrent l'ensemble du vaste territoire carolingien, de l'Ebre à la vallée du Rhin, et de l'Atlantique à l'Adriatique. Rien d'étonnant donc, compte-tenu de ces diversités temporelle et géographique, à ce que des évolutions et des différences apparaissent entre les compositions des alliages constituant les monnaies de notre *corpus*.

Les résultats se sont toutefois révélés particulièrement riches et instructifs, tant du point de vue de la pureté des alliages que de celui des teneurs en éléments-traces caractéristiques.

L'évolution du titre des deniers d'argent carolingiens, à partir de 751 et jusqu'au-delà de 864, est dorénavant connue avec précision. Des tendances générales suggérées par les analyses antérieures, ou supposées d'après les textes de lois ou les trouvailles monétaires, se trouvent confirmées par l'analyse de *corpus* représentatifs. La hausse du titre des monnaies consécutive à la réforme de Charlemagne de 793/4, énoncée par de nombreux auteurs sans avancer de justification solide, ne sera plus dorénavant basée sur quelques maigres résultats, mais pourra être affirmée avec confiance. Des monnaies que l'on est en droit de considérer comme fausses ont en outre été identifiées, confirmant les soupçons des numismates pour certaines, mais le plus souvent toutefois de manière inattendue. Des monnayages secondaires, pour lesquels la rareté des exemplaires ne permet pas d'étude véritablement représentative, ont enfin pu être caractérisés : les résultats obtenus pour les exemplaires de Carloman, Louis roi d'Aquitaine, Pépin I<sup>er</sup> et Pépin II d'Aquitaine, bien que peu nombreux, apportent des informations précieuses pour leur connaissance et leur compréhension.

Le standard d'argent des deniers de Pépin le Bref est très élevé. Plus élevé en tout cas que celui de la première partie du règne de Charlemagne, pour laquelle les variétés de types de revers et le grand nombre de lieux d'émissions ne traduisent pas encore une homogénéisation complète du point de vue de la frappe monétaire. Cette information est inédite et était insoupçonnée. Peut-être l'activité militaire intense de Charlemagne durant les deux premières décennies de son règne l'a-t-elle détourné de préoccupations comme celle de la surveillance des ateliers monétaires.

D'un point de vue numismatique et métrologique, l'unité monétaire est réelle pour l'ensemble du territoire à partir de la réforme fondatrice de 793/4. D'un point de vue analytique, la hausse de la pureté des deniers et l'uniformisation de leurs titres sont visibles et indiscutables et, malgré le faible nombre d'analyses, semblent s'améliorer encore après 812 et l'introduction du monnayage impérial au buste de Charlemagne.

Les bases du règne de Louis le Pieux du point de vue monétaire lors de son accession au trône en 814 sont saines : les deniers sont très purs, et leurs titres standardisés. Ces caractéristiques symptomatiques d'une fabrication monétaire sous surveillance, auxquelles s'ajoutent celles d'une circulation contrôlée qui ressort des trouvailles, sont perpétuées par Louis le Pieux pour ses deux premiers

types monétaires jusqu'en 822/3. L'identification d'une proportion non négligeable de fausses monnaies pour le Type 1 de Louis le Pieux, frappé entre 814 et 818, contraste toutefois légèrement avec la Deuxième période d'émission du règne de Charlemagne pour laquelle tous les deniers analysés paraissent tous authentiques.

Les années durant lesquelles un standard de titre très élevé est maintenu par Charlemagne puis par Louis le Pieux correspondent aux décennies de calme politique et militaire relatif, après l'élargissement du territoire carolingien par le premier, et avant les troubles internes pour la succession du second. Des premiers signes qui traduisent les conflits internes de la seconde partie du règne de Louis le Pieux s'annoncent pour les monnaies du Type 3 de cet empereur : du point de vue de la composition des alliages monétaires, un déclin sensible est observé au regard du titre d'argent moyen et de la dispersion des valeurs. Les résultats démontrent une situation similaire à celle observée pour les monnaies du Type 2 de Charlemagne. Du point de vue numismatique toutefois, les deux périodes présentent des caractéristiques divergentes : tandis que les pièces de Charlemagne antérieures à la réforme démontrent des variétés de type et des lieux d'émissions très nombreux, celles du Type 3 de Louis le Pieux suggèrent un aboutissement dans l'uniformisation des types des monnaies et la centralisation des lieux d'émission. Comme pour les types monétaires précédents, l'étude des trouvailles met en évidence le respect de l'interdiction de circulation des pièces étrangères et décriées.

La tendance à la baisse et à la dispersion du titre des deniers se poursuit et s'amplifie encore pour les émissions des deux royaumes de Francie Occidentale et de Francie Médiane qui échoient respectivement à Charles le Chauve et à Lothaire. Les résultats de nos analyses, bien que relativement peu nombreux pour ces deux souverains, s'accordent avec l'étude numismatique et avec celle des trésors : des types divers sont frappés durant les mêmes années dans des territoires politiquement unifiés ; les pièces du Type 3 de Louis le Pieux n'ont pas été décriées et continuent à circuler ; la masse des deniers fléchit ; la circulation se régionalise. Ces observations font écho à la situation de troubles internes, en particulier pour Charles le Chauve, et de menaces extérieures pour les territoires de chacun des deux frères. La Première période d'émission de Charles le Chauve, ainsi que le règne de Lothaire, correspondent aux années de l'intensification des incursions nordiques en Europe Occidentale. Les analyses montrent de plus que le monnayage de l'Italie pourrait présenter des caractéristiques différentes du reste de l'ex-empire carolingien après 840.

Le territoire de Francie Médiane se scinde à la mort de Lothaire en 855 entre les royaumes d'Italie pour Louis II, de Lotharingie pour Lothaire II, et de



Provence pour Charles. Ici s'arrêtent nos investigations pour la zone correspondant à la Francie Médiante.

En Francie Occidentale, c'est jusqu'au-delà de la réforme monétaire de l'édit de Pîtres de 864 que les analyses ont porté. Malgré un *corpus* modeste pour ces années les plus tardives de notre période d'étude, les analyses montrent le retour à un standard de titre élevé, proche de celui qui caractérise les années 793/4-822/3. Cela confirme le rétablissement d'un contrôle strict de la fabrication monétaire durant la Deuxième période d'émission de Charles le Chauve : le décri des pièces antérieures à 864, l'unité de type pour l'ensemble du territoire – à l'exception notable des monnaies au monogramme pour certains ateliers d'Aquitaine – et le retour au standard de masse correspondant à la livre de Charlemagne le suggèrent. Cette fois encore, les résultats analytiques corroborent les données numismatiques et historiques.

Ce sont ainsi les huit premiers souverains carolingiens, et plus de cent années, durant lesquelles le titre des monnaies d'argent carolingiennes est connu par période d'émission.

En plus de l'évolution temporelle, l'étude du titre des monnaies fait ressortir des tendances locales ou régionales. Les différences sont souvent ténues, et, dans le cas de *corpus* restreints, il s'agit davantage de suggestions plutôt que de tendances réelles avérées. La précision de la méthode LA-ICP-MS permet toutefois de refléter de telles évolutions ; aussi, il a été estimé que toutes celles qui apparaissaient, même peu prononcées, devaient être mentionnées.

Par exemple, la diminution progressive du titre moyen des deniers du Type 2 de Louis le Pieux à mesure que l'on s'éloigne du cœur du territoire carolingien n'est pas suffisamment marquée pour que l'on puisse exclure qu'un nombre plus important d'analyses la contredise. Le parallèle entre cette tendance et la progression des conquêtes des régions concernées justifiait toutefois de faire ressortir cette information.

La différence de titre sous Louis le Pieux pour les années 814-822/3 entre les monnaies de Melle et les exemplaires des autres ateliers semble en revanche refléter la réalité de la frappe monétaire. La tendance est certes nettement moins marquée pour les deniers du Type 2 que pour ceux du Type 1, mais la différenciation des oboles conforte l'hypothèse d'un standard de pureté des monnaies plus faible à Melle durant cette période. Ce résultat est inattendu : la logique aurait voulu que les pièces melloises, fabriquées à partir d'argent extrait localement, aient été les plus pures. Mais le statut particulier de l'atelier de Melle,

en lien direct avec un site de production d'argent, a pu bénéficier aux monnayeurs qui en auraient tiré profit.

Après 840, les monnaies de Melle datées avec certitude de la Première période d'émission de Charles le Chauve semblent au contraire être constituées d'un alliage nettement plus pur que les autres. On peut dans ce cas imaginer que la proximité de l'atelier mellois avec un site d'extraction d'argent lui aurait permis d'atténuer la chute du titre moyen observée pour les autres ateliers durant cette période.

La problématique des monnaies au monogramme carolin de période d'émission incertaine de Melle est complexe du point de vue numismatique. L'analyse élémentaire d'un grand nombre de ces monnaies apporte des informations essentielles : la combinaison de l'étude du titre d'argent semble permettre de différencier les exemplaires de la Première période de Charles le Chauve de ceux de la Deuxième période d'émission de ce souverain, et de ceux du Type 3 de Charlemagne. L'étude des teneurs en éléments-traces caractéristiques semble quant à elle constituer une approche efficace pour distinguer les émissions melloises au monogramme de Charlemagne de celles de Charles le Chauve postérieures à la réforme de l'édit de Pîtres de 864. L'analyse de pièces issues de trésors datés précisément par la présence d'exemplaires d'autres ateliers permettrait d'associer avec confiance des caractéristiques de composition à une période d'émission.

L'Italie carolingienne constitue un territoire particulier parmi l'ensemble de ceux conquis par Charlemagne. Le dynamisme des ateliers de l'ex-royaume lombard qui ressort de l'étude des trésors contraste avec la rareté des trouvailles qui y ont été mises au jour. L'examen du titre d'argent des monnaies carolingiennes d'Italie à partir de 781 montre une évolution quelque peu différente de celle qui caractérise le reste du territoire Franc : la progression de la pureté des deniers italiens semble en effet systématique lors de chaque changement de type monétaire entre 781 et 822/3 ; pour ceux des autres ateliers, l'augmentation du titre est marquée pour le passage du Type 2 au Type 3 de Charlemagne, puis augmente très légèrement et se stabilise pour les Types 1 et 2 de Louis le Pieux.

C'est naturellement que les problématiques propres à l'Italie carolingienne nous amènent jusqu'à Venise ; il convient toutefois de traverser la frontière de l'empire pour atteindre cette enclave byzantine. Bien que constatée par le passé, la singularité d'une frappe de deniers à Venise selon le type carolingien n'avait à ce

jour pas été corrélée avec une différenciation de ces monnaies par rapport aux « vrais » exemplaires carolingiens.

De toutes les problématiques questions dans la deuxième partie de cette thèse, la particularité du monnayage vénitien frappé selon le type carolingien est celle dont les implications historiques avérées et potentielles sont les plus importantes.

Le titre d'argent des deniers vénitiens, tout d'abord, est apparu plus faible que celui des alliages constituant les pièces contemporaines des autres ateliers, qu'ils soient situés en Italie ou ailleurs. Cette information est de première importance si l'on considère les connaissances spécifiques à Venise qui ressortent de l'étude numismatique des monnaies carolingiennes de cet atelier : dès que les premières frappes y ont été mises en œuvre en 818 ou peu après, il semble que de très grandes quantités de deniers vénitiens se soient intégrés à la circulation monétaire carolingienne, et qu'elles aient diffusé dans l'ensemble de ce territoire. Ce sont donc des monnaies d'argent de valeur intrinsèque plus faible que les marchands vénitiens ont employées pour leurs transactions avec les Francs. Au bénéfice lié à ces échanges s'ajoutait celui propre à la fabrication monétaire elle-même. De la même manière que le commerce méditerranéen s'était développé de manière spectaculaire à Venise durant le VIII<sup>e</sup> siècle, il semble donc que les Vénitiens aient très vite pris la mesure des bénéfices qui pouvaient être tirés de la frappe monétaire, après l'accord conclu en 812 entre Charlemagne et Michel I<sup>er</sup>. L'analyse chimique des monnaies vénitiennes de Louis le Pieux appuie donc les auteurs qui insistent sur le rôle d'intermédiaire commercial de Venise entre Orient et Occident durant le haut Moyen Age, et sur sa capacité à tirer profit de sa situation géopolitique à la fois si singulière et si favorable.

Les facteurs propices aux études de provenance des métaux monnayés à travers la composition chimique des alliages étaient réunis pour la réussite l'application, aux monnaies de Venise, d'une méthode dont les caractéristiques permettent les études de provenance à travers les teneurs de certains éléments-traces. Encore fallait-il que la composition intrinsèque de ces alliages permette leur différenciation par des méthodes de caractérisation élémentaire et isotopique.

Les analyses montrent indiscutablement une particularité de l'argent vénitien, pour la première période d'émission de cet atelier du moins, soit entre 818 et 822/3. On mesure ici tout l'intérêt de la coïncidence de notre période d'étude avec celle du début de la frappe monétaire à Venise : le stock d'argent monnayé vénitien, bien que vraisemblablement au moins partiellement carolingien, pourrait donc comprendre en des proportions non négligeables les bénéfices métalliques de leurs expéditions en Afrique du nord et en Méditerranée Orientale. C'est donc de

plain-pied que la caractérisation chimique des alliages monétaires carolingiens et vénitiens nous fait entrer dans les problématiques dérivées de la thèse de Pirenne. Les implications de ces résultats ne concernent plus seulement l'empire carolingien, sa production d'argent, sa frappe et sa circulation monétaires. C'est bien au-delà, à travers la Méditerranée, et jusqu'aux confins de l'Asie Centrale, que peuvent se trouver certaines réponses aux questions soulevées par ces résultats. L'étude préliminaire du monnayage d'argent arabe livre des éléments de réflexion intéressants, mais dont l'interprétation complexe incite à systématiser les analyses élémentaires et isotopiques de tels échantillons pour identifier des signatures géochimiques. La poursuite de telles recherches pourrait alimenter la thèse de Pirenne et contribuer à la connaissance des échanges commerciaux à longue distance durant le haut Moyen Age.

## Liste des références de la deuxième partie

- Allan, J.W., 1979. *Persian Metal Technology 700-1300 AD.*, London, 179 p.
- Amandry, M., Dhémin, M., Popoff, M., Thierry, F. et Vellet, C., 2001. *Dictionnaire de numismatique*. Larousse, Paris, 628 p.
- Ammerman, A.J., sous presse. In: A.J. Ammerman (Editeur), *Venice before San Marco*. Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- Armstrong, S., 1998. Carolingian coin hoards and the impact of the Viking raids in the ninth century. *Numismatic Chronicle*, 158, p. 131-164.
- Barrandon, J.-N. et Dumas, F., 1990. Minerai de Melle et monnaies durant le haut Moyen-Age : relations établies grâce aux isotopes du plomb. *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, 45, p. 901-906.
- Bernareggi, E., 1977. I tremissi longobardi e carolingi del ripostiglio di Ilanz, nei Grigioni. In, *Numismatica e Antichità Classiche. Quaderni Ticinesi* 6, p. 341-364.
- Bernareggi, E., 1983. Carolingian gold coins from the Ilanz hoard. In: C.N.L. Brooke, B.H.I.H. Stewart, J.G. Pollard et T.R. Volk (Editeurs), *Studies in Numismatic Method presented to Philip Grierson*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 127-135.
- Blackburn, M.A.S., 1995. Money and coinage. In: R. McKitterick (Editeur), *The New Cambridge Medieval History. Volume 2, c.700–c.900*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 538-559.
- Blanchet, A. et Dieudonné, A., 1912-1936. *Manuel de numismatique française*. Picard, Paris.
- Bolin, S., 1953. Mohammed, Charlemagne and Ruric. *The Scandinavian Economic History Review*, 1 (1-2), p. 5-23.
- Bompaire, M. et Depierre, G., 1989. Le trésor carolingien de Dijon, rue du Chapeau Rouge. *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, 44, p. 577-581.
- Bompaire, M. et Dumas, F., 2000. *Numismatique médiévale : monnaies et documents d'origine française*. L'atelier du médiéviste, 7. Brepols, Turnhout, 687 p.

- Bompaire, M. et Guerra, M.F., 1997. Analyses de monnaies françaises du XI<sup>e</sup> siècle, le problème du zinc. In: B. Kluge et B. Weisser (Editeurs), XII. Internationaler Numismatischer Kongress, Berlin, p. 876-884.
- Bompois, F., 1871. Notice sur un dépôt de Monnaies Carolingiennes découvert en Juin 1871 aux environs du Veullin, Commune d'Apremont, département du Cher, Paris, bureau de la Revue Numismatique, 61 p.
- Brambilla, C., 1883. Monete di Pavia, raccolte ed ordinatamente dichiarate da Camillo Brambilla, Pavia, 502 pp.
- Brown, T.S., 1991. Byzantine Italy c. 680-876. In: R. McKitterick (Editeur), The New Cambridge Medieval History: II. c. 700 - c. 900. Cambridge University Press, Cambridge p. 320-348.
- Bruand, O., 2002. Voyageurs et marchandises aux temps carolingiens. Les réseaux de communication entre Loire et Meuse aux VIII<sup>e</sup> et IX<sup>e</sup> siècles. Bibliothèque du Moyen Age. De Boeck Université, Bruxelles, 357 p.
- Bullough, D., 1962. Baiuli in the Carolingian regnum Langobardorum and the career of Abbot Waldo (†813) English Historical Review, 77, p. 625-637.
- Burjakov, J., 2007. L'extraction minière en Asie Centrale aux VIII<sup>e</sup>-XI<sup>e</sup> siècles de notre ère. In, Islamisation de l'Asie Centrale. Pratiques sociales et acculturation dans le monde turco-sogdien, Collège de France, Paris.
- Chenu, P., 1932. Un dépôt de monnaies carolingiennes dans le département du Cher. Mémoires de la Société historique, littéraire et scientifique du Cher, XXXIX, p. 103-126.
- Coupland, S., 1988a. Dorestad in the ninth century: the numismatic evidence. Jaarboek voor Munt- en Penningkunde, 75, p. 5-25.
- Coupland, S., 1988b. La chronologie des émissions monétaires de Louis le Pieux. Bulletin de la Société Française de Numismatique, 43 (7), p. 431-433.
- Coupland, S., 1989. The coinages of Pippin I and Pippin II of Aquitaine. Revue Numismatique, 31, p. 194-222.
- Coupland, S., 1990. Money and coinage under Louis the Pious. Francia, 17, p. 23-54.
- Coupland, S., 1991. The Early Coinage of Charles The Bald, 840-864. Numismatic Chronicle, 151, p. 121-158.
- Coupland, S., 1999. The Frankish Tribute Payments to the Vikings and their Consequences. Francia, 26 (1), p. 57-75.
- Coupland, S., 2001. The coinage of Lothar I (840-855). Numismatic Chronicle, 161, p. 157-198.
- Coupland, S., 2002. Trading places: Dorestad and Quentovic reassessed. Early Medieval Europe, 11 (3), p. 209-232.

- Coupland, S., 2005. Charlemagne's coinage: ideology and economy. In: J. Story (Editeur), Charlemagne: empire and society. Manchester University Press, Manchester, p. 211-229.
- Coupland, S., 2007. Carolingian coinage and the Vikings. Studies on power and trade in the 9<sup>th</sup> century. Variorum collected studies, Ashgate, Aldershot.
- Cowell, M.R. et Lowick, N.M., 1988. Silver from the Panjhir mines. In: A. Oddy (Editeur), Metallurgy in Numismatics. Royal Numismatic Society, Londres, p. 65-74.
- Cracco Ruggini, L., Pavan, M., Cracco, G. et Ortalli, G. (Editeurs), 1992. Origini-età ducale. Storia di Venezia dalle origini alla caduta della Serenissima, 1. Enciclopedia Italiana, Rome, 961 p.
- Crinon, P., 2004. Le monnayage de Carloman (768-771) : à propos d'un denier inédit de Reims. Bulletin de la Société Française de Numismatique, 59 (10), p. 246-249.
- Crinon, P. et Bedel, J.-C., 2003. Contribution au monnayage viennois du VIII<sup>e</sup> siècle. Bulletin de la Société Française de Numismatique, 58 (8), p. 181-184.
- de Benedettis, G. et Lafaurie, J., 1998. Trésor de monnaies carolingiennes du VIII<sup>e</sup> siècle trouvé à Larino (Italie, Molise). Les monnaies de Louis, roi d'Aquitaine (781-794). Revue Numismatique, 153, p. 217-243.
- de Longpérier, A., 1858. Cent deniers de Pépin, de Carloman et de Charlemagne découverts près d'Imphy en Nivernais. Revue Numismatique, 2, p. 202-262.
- de Saulcy, F., 1837. Deniers carlovingiens, déterrés à Belvezet, près d'Usez (Gard). Revue Numismatique, p. 347-359.
- Depeyrot, G., 1998. Le numéraire carolingien. Corpus des monnaies. Moneta. Florange, Wetteren, Paris, 314 p.
- Devroey, J.-P., 2006. Puissants et misérables. Système social et monde paysan dans l'Europe des Francs (VI<sup>e</sup>-IX<sup>e</sup> siècles). Académie Royale de Belgique, Bruxelles, 727 p.
- Dhénin, M. et Schiesser, P., 2007. Oboles mérovingiennes. Revue Numismatique, 163, p. 282-313.
- Diefenbach, W., 1924. Geldwesen und Münzprägung in Bingen. Jahrbuch des Frankfurter Numismatischen Gesellschaft.
- Doridot, A., Robbiola, L. et Téreygeol, F., 2006. Production expérimentale de laiton par cémentation en creuset ouvert, avec du minerai de zinc, selon les recettes médiévales et modernes. Archéosciences. Revue d'Archéométrie, 30, p. 15-24.

- Dumas-Dubourg, F., 1971. Le Trésor de Fécamp et le monnayage en Francie occidentale, pendant la seconde moitié du Xe siècle. Mémoires de la Section d'archéologie. Bibliothèque nationale, Paris, XXX Pl.-309 p.
- Duplessy, J., 1956. La circulation des monnaies arabes en Europe Occidentale du VIII<sup>e</sup> au XIII<sup>e</sup> siècle, *Revue Numismatique*, 5 (18), p. 101-164.
- Duplessy, J., 1985. Les trésors monétaires médiévaux et modernes découverts en France. 1, 751-1223. Bibliothèque nationale, Paris, 158p.
- Engel, A. et Serrure, R., 1891-1905. *Traité de numismatique du moyen âge*. A. Forni, Paris.
- Eniosova, N.V. et Mitoyan, R., 2008. Arabic coins as a silver source for Slavonic and Scandinavian jewellers in the 10<sup>th</sup> century. In, *International Symposium on Archaeometry*, Siena, Italy.
- Fillon, B., 1856. *Etudes numismatiques*, Paris, 180 p.
- Frère, H., 1977. Le denier carolingien : spécialement en Belgique. *Numismatica Lovaniensia*. Institut supérieur d'archéologie et d'histoire de l'art, Séminaire de numismatique Marcel Hoc, Louvain-la-Neuve, 113 p.
- Frère, H., 1980. Le denier carolingien. *Revue Belge de Numismatique*, 126, p. 109-127.
- Gariel, E. (Editeur), 1883-4. *Les monnaies royales de France sous la race carolingienne*, Strasbourg.
- Gonnard, R., 1935-6. *Histoire des doctrines monétaires dans son rapport avec l'histoire des monnaies*, Paris, 2 Vol., 289 p.
- Gordus, A.A., Gordus, J.P. et Beck, C.W., 1974. Neutron activation analysis of gold impurity levels in silver coins and art objects. In: C.W. Beck (Editeur), *Archaeological chemistry. Advances in Chemistry Series*. American Chemical Society, Washington D.C., p. 124-147.
- Grat, F., Vielliard, J. et Clémencet, S. (Editeurs), 1964. *Annales de Saint-Bertin*. Société d'Histoire de France, Paris, 295 p.
- Grierson, P., 1951. The gold solidus of Louis the Pious and its imitations. *Jaarboek voor Munt- en Penningkunde*, 38, p. 1-41.
- Grierson, P., 1954a. Cronologia delle riforme monetarie di Carlo Magno. *Rivista Italiana di Numismatica*, p. 65-79.
- Grierson, P., 1954b. Le sou d'or d'Uzès. *Le Moyen Age*, 60, p. 293-309.
- Grierson, P., 1958. Some modern forgeries of Carolingian coins. In: H. Ingholt (Editeur), *Centennial Volume of the American Numismatic Society*, New York, p. 303-315.



- Grierson, P., 1967. Money and coinage under Charlemagne. In: W. Braunsfels (Editeur), Karl der Grosse: Lebenswerk und Nachleben. Bd.1:Persönlichkeit und Geschichte, p. 501-536.
- Grierson, P., 1977. Un denier carolingien de Saint-Bavon de Gand. Bulletin du Cercle d'Etudes Numismatiques, p. 59-61.
- Grierson, P. et Blackburn, M., 1986. Medieval European Coinage: The Early Middle Ages (5<sup>th</sup>-10<sup>th</sup> Centuries). Cambridge University Press, 674 p.
- Gruaz, J., 1922. Le trésor d'Hermenches et les temps carolingiens. Revue historique vaudoise, 30, p. 193-212.
- Guey, J., 1965. Peut-on se fier aux essais chimiques ? Revue Numismatique, 6 (7), p. 110-122.
- Gyselen, R., Nègre, A., 1982. Un trésor de Gazira (haute Mésopotamie) : monnaies d'argent enfouies au début du IIIe siècle de l'Hégire/au début du IXe siècle de notre ère. Revue Numismatique, 6 (24), p. 170-205.
- Haertle, C.M., 1997. Karolingische Münzfunde aus dem 9. Jahrhundert. Bohlau Verlag, Cologne.
- Hlawitschka, E., 1960. Franken, Alemannen, Bayern und Burgunder in Oberitalien (774-962). In, Forschungen zur oberrheinischen Landesgeschichte, Fribourg-en-Brisgau, p. 23-36.
- Hodges, R. et Whitehouse, D., 1996. Mahomet, Charlemagne et les origines de l'Europe. Traduction par C. Morrisson avec la collaboration de J. Lefort et J.-P. Sodini. Réalités Byzantines 5, Paris, 189 p.
- Hourlier, M., 1998. Une empreinte monétaire laonnoise sur plomb (XII<sup>e</sup>-XIII<sup>e</sup> siècles). Bulletin de la Société Française de Numismatique, 53 (6), p. 132-134.
- Ilisch, L., Lorenz, S. et Stern, W.B., 2003. Dirham und Rappenpfennig Mittelalterliche Munzprägung in Bergbauregionen Analysenreihen. Dirham und Rappenpfennig. R. Habelt, Bonn, 204 p.
- Klappauf, L., 2003a. 10 Jahre Montanarchäologie im Harz – Resümee und Ausblick, Man and Mining-Mensch und Bergbau. In: T. Stöllner (Editeur), Studies in honour of Gerd Weisgerber on occasion of his 65th birthday, Bochum, p. 227-235.
- Klappauf, L., 2003b. Rammelsberg near Goslar, northern Germany: 3000 years old mining district waits to be explored. In, International Conference Archaeometallurgy in Europe, Milan, p. 645-655.
- Lafaurie, J., 1963. Trésor de deniers mérovingiens trouvé à Savonnières (Indre-et-Loire). Revue Numismatique, 6 (5), p. 65-81.

- Lafaurie, J., 1968. L'article XII de l'Edit de Pîtres. Bulletin de la Société Française de Numismatique, p. 324-326.
- Lafaurie, J., 1969-70. Numismatique romaine et médiévale. Annuaire de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes, IVe section, p. 323-326.
- Lafaurie, J., 1970. Numismatique. Des Carolingiens aux Capétiens. Cahiers de civilisation médiévale, XIII (1), p. 117-137.
- Lafaurie, J., 1972. Le trésor carolingien de Sarzana-Luni. In, Le zecce minori toscane fino al XIV secolo. Atti del 3° Convegno internazionale di studi, Pistoia, p. 49-51.
- Lafaurie, J., 1974. Numismatique : Des Mérovingiens aux Carolingiens. Les monnaies de Pépin le Bref. Francia, 2, p. 26-48.
- Lafaurie, J., 1977. La surveillance des ateliers monétaires au IX<sup>e</sup> siècle. In: W. Paravicini et K.F. Werner (Editeurs), Histoire comparée de l'administration (IV<sup>e</sup>-XVIII<sup>e</sup> siècles). Artemis Verlag, Tours, p. 486-496.
- Lafaurie, J., 1978. Les monnaies impériales de Charlemagne. Académie des inscriptions et belles-lettres. Comptes-rendus, p. 154-176
- Lafaurie, J., 1981. L'article XI de l'édit de Pîtres du 25 juin 864. In, LAGOM. Festschrift für Peter Berghaus zum 60. Geburtstag am 20. November 1979. Numismatischer Verlag der Münzenhandlung H. Dombrowski, GmbH, Münster, p. 113-117.
- Lafaurie, J., 1983. The *novi denarii* and forgery in the ninth century. In: C.N.L. Brooke, B.H.I.H. Stewart, J.G. Pollard et T.R. Volk (Editeurs), Studies in Numismatic Method Presented to Philip Grierson. Cambridge University Press, Cambridge, p. 137-146.
- Lafaurie, J., 1987. Deniers de Pépin le Bref frappés à Angers. Bulletin de la Société Française de Numismatique, 42 (2), p. 154-156.
- Lafaurie, J., 1996. VVIC IN PONTIO : les monnaies mérovingiennes de VVICVS. Analyses de Jean-Noël Barrandon. Revue Numismatique, 151, p. 181-239.
- Lebecq, S., 1983. Marchands et navigateurs frisons du haut moyen âge. Presses Universitaires de Lille, Lille, 375 p.
- McCormick, M., 2001. Origins of the European Economy: Communications and Commerce, AD 300-900. Cambridge University Press, Cambridge, 1101 p.
- McCormick, M., 2002. Charlemagne and the Mediterranean World: Communications, Arab Coins and Commerce at the Time of the Paderborn Meeting. In: P. Godman, J. Jarnut et P. Johanek (Editeurs), Am Vorabend der Kaiserkrönung : das Epos "Karolus Magnus et Leo papa" und der Papstbesuch in Paderborn 799. Akademie Verlag, Berlin, p. 193-218.

- McCormick, M., 2007. Where do trading towns come from? Early Medieval Venice and the Northern emporia. In: J. Henning (Editeur), *Post-Roman Towns, Trade and Settlement in Europe and Byzantium Vol. 1: The Heirs of the Roman West*. Millenium Studies 19, Berlin, p. 43-70.
- McCormick, M., sous presse. Venice on the threshold: early economic growth. In: A.J. Ammerman (Editeur), *Venice before San Marco*. Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- McKerrell, H. et Stevenson, R.B.K., 1972. Some Analyses of Anglo-Saxon and Associated Oriental Silver Coinage. In: E.T. Hall et D.M. Metcalf (Editeurs), *Methods of chemical and metallurgical investigation of ancient coinage*. Royal Numismatic Society, Londres, p. 195-209.
- Metcalf, D.M., 1965. Coins of Pepin minted at Saint-Denis? In, *Cunobelin: The Yearbook of the British Association of Numismatic Societies*, p. 19-29.
- Metcalf, D.M., 1968. Pre-Reform Coins of Charlemagne from the Grave-find at Breuvery. *Numismatic Circular*, 76 (5), p. 150-154.
- Metcalf, D.M., 1972. Analyses of the Metal Contents of Medieval Coins. In: E.T. Hall et D.M. Metcalf (Editeurs), *Methods of chemical and metallurgical investigation of ancient coinage*.
- Metcalf, D.M., 1983. Interpreting the alloy of the Merovingian silver coinage. In: C.N.L. Brooke, B.H.I.H. Stewart, J.G. Pollard et T.R. Volk (Editeurs), *Studies in Numismatic Method Presented to Philip Grierson*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 113-126.
- Metcalf, D.M. et Merrick, J.M., 1967. Studies in the composition of early medieval coins. *Numismatic Chronicle*, p. 217-231.
- Metcalf, D.M., Merrick, J.M. et Hamblin, L.K., 1968. Studies in the Composition of Early Medieval Coins. *Minerva Numismatic Handbooks*, 3, Newcastle, 63 p.
- Metcalf, D.M. et Northover, J.P., 1988. Carolingian and Viking coins from the Cuerdale hoard: an interpretation and comparison of their metal contents. *Numismatic Chronicle*, 148, p. 97-116.
- Metcalf, D.M. et Northover, J.P., 1989. Coinage Alloys from the Time of Offa and Charlemagne to c.864. *Numismatic Chronicle*, 149, p. 101-120.
- Meyers, P., Van Zelst, L. et Sayre, E.V., 1974. Major and Trace Elements in Sasanian Silver. In: C.W. Beck (Editeur), *Archaeological Chemistry*. American Chemical Society, Washington, p. 22-33.
- Moegaard, J.C., 2008. L'importation des monnaies étrangères dans l'empire carolingien. *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, 63 (8), p. 170-172.

- Morrison, K.F., 1963. Numismatics and Carolingian Trade: A Critique of the Evidence. *Speculum*, 38 (3), p. 403-432.
- Morrison, K.F. et Grunthal, H., 1967. Carolingian Coinage. *Numismatic Notes and Monographs* 158, New York.
- Morrisson, C., Barrandon, J.-N. et Morrisson, C., 1999. Or du Brésil, Monnaie et Croissance en France au XVIII<sup>e</sup> siècle. *Cahiers Ernest-Babelon*, 7. CNRS Éditions, Paris, 222 p.
- Mulazzani, G., 1888. Studi economici. *Rivista Italiana di Numismatica*, p. 41-72.
- Naster, P., 1950. Trouvaille de monnaies carolingiennes à Zelzate (1949). *Revue Belge de Numismatique*, p. 208-224.
- Noonan, T.S., 1982. Ninth-century dirham hoards from Northwestern Russia and the Southeastern Baltic. *Journal of Baltic Studies*, 13 (3), p. 220-244.
- Noonan, T.S., 1986. Early 'Abbasid Mint Output. *Journal of the Economic and Social History of the Orient*, 29 (2), p. 113-175.
- Noonan, T.S., 1998. The Islamic World, Russia and the Vikings, 750-900: The Numismatic Evidence. *Variorum Collected Series Studies*, 595. Ashgate, Alderscott, Brookfield.
- Papadopoli, N., 1893. *Le Monete di Venezia, descritte ed illustrate da Nicolo Papadopoli*. F. Ongania, Venezia, 425 p.
- Parvérie, M., 2008. La circulation des monnaies arabes en Aquitaine et Septimanie VIII<sup>e</sup>-IX<sup>e</sup> siècles, *Bulletin de la Société numismatique du Limousin*, 15, p. 7-15.
- Pirenne, H., Vercauteren, F. et Pirenne, J., 1992. Mahomet et Charlemagne. *Quadrige*. Presses universitaires de France, Paris, X-218 p.
- Pomiès, C., Cocherie, A., Guerrot, C., Marcoux, E. et Lancelot, J., 1998. Assessment of the precision and accuracy of lead-isotope ratios measured by TIMS for geochemical applications: example of massive sulphide deposits (Rio Tinto, Spain). *Chemical Geology*, 144 (1-2), p. 137-149.
- Prou, M., 1896. Les monnaies carolingiennes. *Catalogue des monnaies françaises de la Bibliothèque Nationale*, Paris, 180 p.
- Prou, M., 1898. Note sur le titre de quelques deniers des IX<sup>e</sup> et XI<sup>e</sup> siècles essayés à la Monnaie. *Gazette Numismatique Française* 2, p. 227-232.
- Riché, P., 1983. Les Carolingiens. Une famille qui fit l'Europe. Hachette, Paris, 490 p.
- Rovelli, A., 1995. Il denaro di Pavia nell'alto medioevo (VIII-XI secolo). *Bollettino della Società Pavese di Storia Patria*, XLVII, p. 71-90.

- Rovelli, A., 2000. Some considerations on the coinage of Lombard and Carolingian Italy. In : I.L. Hansen et C. Wickham (Editeurs), *The long eighth century*. Brill, Leiden, p. 195-224.
- Rovelli, A., 2003. I denari di Carlo Magno con legenda +CARLVSRFXFRETLANGACPATROM e il monogramma greco. *Annali dell'Istituto Italiano di Numismatica*, 50, p. 217-225.
- Rovelli, A., sous presse. The mints of the Kingdom of Italy: a survey. In: S. Gaspari (Editeur), 774. *Ipotesi su una transizione*, Turnhout.
- Salaün, G., 2003. Pour en finir avec Charles le Chauve en Bretagne. *Bulletin de la Société Française de Numismatique*, 58 (8), p. 184-185.
- Sambon, G., 1912. *Repertorio generale delle monete coniate in Italia*, Paris, 206 p.
- Schiesser, P., à paraître. Les oboles uniface de Charlemagne de Melle. In, *Numismatique et archéologie en Poitou-Charentes*, Niort.
- Schmit, E., 1920. Contribution à l'étude de la numismatique carolingienne. Découverte à Breuvery-sur-Cooles, canton d'Ecury-sur-Cooles (Marne). *Association française pour l'avancement des sciences. XLIV compte rendu, 44<sup>e</sup> session*, p. 596-603.
- Serrure, R., 1884-1885. Les carolingiennes belges de la collection Gariel. *Bulletin mensuel de numismatique et d'archéologie*, 4, p. 149-164.
- Steuer, H., 1987. Gewichtsgeldwirtschaften im frühgeschichtlichen Europa, (4), 1987. In: K. Düwel (Editeur), *Untersuchungen zu Handel und Verkehr der vor- und frühgeschichtlichen Zeit in Mittel- und Nordeuropa*. *Abhandlungen der Akademie der Wissenschaften in Göttingen*, Göttingen, p. 405-527.
- Steuer, H., Sternel, W.B. et Goldenberg, G., 2002. Der Wechsel von der Münzgeld- zur Gewichtsgeldwirtschaft in Haithabu um 900 und die Herkunft des Münzsilbers im 9. und 10. Jahrhundert In: K. Brandt, M. Müller-Wille et C.H. Radtke (Editeurs), *Haithabu und die frühe Stadtentwicklung im nördlichen Europa*. *Schriften des Archäologischen Landesmuseums*, Münster, p. 133-167.
- Stos-Gale, Z.A., 1998. Lead Isotope Analysis Of Coins - A Review. In: W.A. Oddy et M.R. Cowell (Editeurs), *Metallurgy in numismatics*. Royal Numismatic Society, London, p. 348-366.
- Stos-Gale, Z.A., Gale, N.H. et Annetts, N., 1996a. Lead isotope data from the Isotrace laboratory, Oxford: *Archaeometry Database 3, Ores from the Aegean, Part 1*. *Archaeometry*, 38 (2), p. 381-390.
- Stos-Gale, Z.A., Gale, N.H., Annetts, N., Todorov, T., Lilov, P., Raduncheva, A. et Panayotov, I., 1998. Lead isotope data from the Isotrace laboratory, Oxford:

- Archaeometry Database 5, ores from Bulgaria. *Archaeometry*, 40 (1), p. 217-226.
- Stos-Gale, Z.A., Gale, N.H., Houghton, J. et Speakman, R.J., 1995. Lead isotope data from the Isotracer laboratory, Oxford: *Archaeometry Database 1, Ores from the Western Mediterranean*. *Archaeometry*, 37 (2), p. 407-415.
- Stos-Gale, Z.A., Gale, N.H., Houghton, J., Speakman, R.J. et Rohl, B.M., 1996b. Lead isotope data from the Isotracer laboratory, Oxford: *Archaeometry Database 2, Galena from Britain and Ireland*. *Archaeometry*, 38 (1), p. 165-180.
- Stos-Gale, Z.A., Gale, N.H., Maliotis, G. et Annetts, N., 1997. Lead isotope data from the Isotracer laboratory, Oxford: *Archaeometry Database 4, Ores from Cyprus*. *Archaeometry*, 39 (1), p. 237-246.
- Suchodolski, S., 1980. Les livres carolingiennes. In: S.C.d.E. Numismatics (Editeur), II Simposi Numismatic de Barcelona, Barcelona, p. 43-46.
- Suchodolski, S., 1983. On the rejection of good coin in Carolingian Europe. In: C.N.L. Brooke, B.H.I.H. Stewart, J.G. Pollard et T.R. Volk (Editeurs), *Studies in Numismatic Method Presented to Philip Grierson*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 147-152.
- Téreygeol, F., Hoelzl, S. et Horn, P., 2005. Le monnayage de Melle au haut Moyen Age : état de la recherche. *Bulletin de l'Association des Archéologues de Poitou-Charentes*, 34, p. 49-56.
- Van der Chijs, P.O., 1866. *De Munten der Frankische- en Duitsch-Nederlandische Vorsten*. Teyler's Tweede Genootschap. De Erven F. Bohn, Harlem, 395 p.
- Van Es, W.A. et Verwers, W.J.H., 1980. Excavations at Dorestad 1. The harbour: Hoogestraat 1. ROB, Amersfoort, 319 p.
- Van Gelder, H.E., 1961. De karolingische muntslag te Duurstede. *Jaarboek voor Munt- en Penningkunde*, 48, p. 15-42.
- Van Gelder, H.E., 1985. De Karolingische muntvondst Roermond. *Jaarboek voor Munt- en Penningkunde*, 72, p. 13-47.
- Van Rey, M., 1972. Die Münzprägung Karls des Kahlen und die westfränkische Königslandschaft. In, *Die Stadt in der europäischen Geschichte*. Festschrift Edith Ennen, Bonn, p. 153-184.
- Verhulst, A., 2002. *The Carolingian economy*. Cambridge University Press, Cambridge, 160 p.
- Völckers, H.H., 1965. Karolingische Münzfunde der Frühzeit (751-800). *Abhandlungen der Akademie der Wissenschaften in Göttingen. Philologisch-historische Klasse*. Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen, 218 p.

Weiller, R., 1988. Die Münzen von Trier. Erster Teil. Erster Abschnitt. Publikationen der Gesellschaft für Rheinische Geschichtskunde. Droste Verlag GmbH, Düsseldorf, 573 p.





# Annexes



# Table des Annexes

Annexe 1. Analyse des monnaies d'argent par ANRC	p. 467
Annexe 2. Comparaison des teneurs en argent déterminées sur la tranche et la face de mêmes monnaies par LA-ICP-MS	p. 473
Annexe 3. Comparaison des teneurs déterminées par LA-ICP-MS et par ANRC	p. 475
Annexe 4. Recensement des analyses antérieures de monnaies similaires à celles de notre <i>corpus</i>	p. 483
Annexe 5. Résultats des analyses des rapports isotopiques du plomb	p. 497
Annexe 6. Comparaison de la signature isotopique du plomb des deniers vénitiens avec celles des bases de données	p. 501
Annexe 7. Catalogue simplifié des monnaies arabes analysées	p. 505
Annexe 8. Résultats des analyses élémentaires de monnaies arabes par LA-ICP-MS	p. 519



# Annexe 1 :

## Analyse des monnaies d'argent par Activation aux Neutrons Rapides de Cyclotron

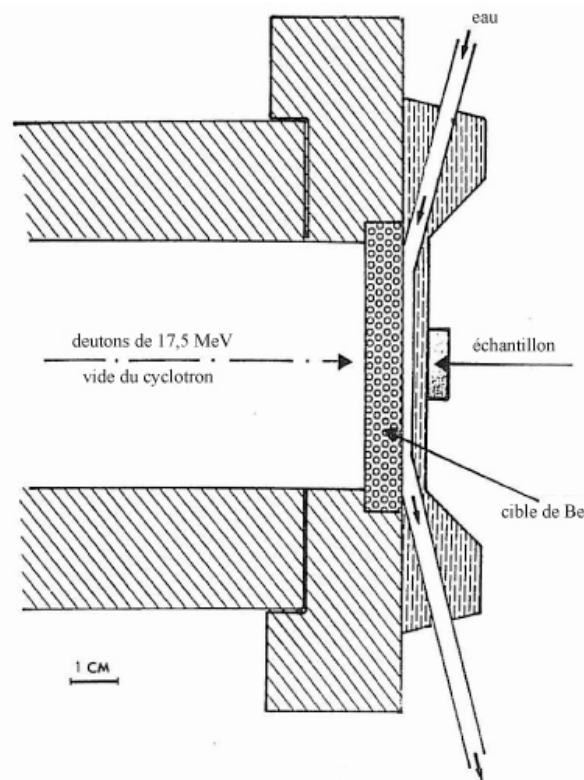
L'analyse par Activation aux Neutrons Rapides de Cyclotron (ANRC) est une méthode de caractérisation élémentaire non-destructive, et globale dans le cas de la caractérisation de monnaies. Deux étapes distinctes forment le processus d'analyse par ANRC : dans un premier temps, l'échantillon est irradié par un flux de neutrons rapides ; dans un deuxième temps, les rayonnements  $\gamma$  émis par les radio-isotopes formés lors l'irradiation sont mesurés, et le signal correspondant aux raies caractéristiques de chacun des radio-isotopes permet de déterminer la composition élémentaire de l'objet.

La première application de l'analyse de monnaies anciennes à l'aide de neutrons rapides date de la fin des années 1960 (Meyers, 1969). L'énergie des particules chargées incidentes utilisée par Meyers (26 MeV) ne permettait toutefois pas de doser les éléments-traces contenus dans les alliages (Guerra et Barrandon, 1998). C'est une énergie des particules incidentes plus faible, de 17,5 MeV, qu'il a été décidé d'employer au Centre Ernest Babelon pour l'analyse des monnaies anciennes par ANRC (Beauchesne, 1986). Cette énergie caractéristique permet d'analyser les constituants majeurs comme les éléments mineurs et traces (Guerra et Barrandon, 1998). Les irradiations sont effectuées au cyclotron du CEMHTI (Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation – CNRS, Orléans).

La première étape de l'analyse par ANRC est l'irradiation de l'échantillon dans un flux de neutrons rapides. Les neutrons rapides sont caractérisés par leur énergie : celle-ci est supérieure à celle qui caractérise les neutrons thermiques et les

neutrons épithermiques. L'énergie des neutrons rapides est supérieure à 1 MeV environ.

Dans l'analyse par ANRC, les neutrons rapides qui irradient l'échantillon sont créés par la réaction d'un faisceau de particules chargées (des deutons) sur une cible métallique de numéro atomique faible. Cette cible est dans notre cas constituée par un disque en béryllium très pur de 60 mm de diamètre et de 8 mm d'épaisseur (Figure 1). Le béryllium permet une bonne conduction thermique, un rendement en neutrons élevé et offre une durée de vie importante. La réaction qui se produit est :  ${}^9_4\text{Be} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^1_0\text{n} + {}^{10}_5\text{B}$ . Les neutrons produits par l'irradiation de la cible en béryllium ont une énergie comprise entre quelques dizaines d'eV et plusieurs MeV. L'énergie moyenne est de 7,5 MeV. Cette valeur permet un dosage de la plupart des constituants des alliages monétaires à base d'argent : argent, cuivre, plomb, or, zinc, étain, arsenic et antimoine.



**Figure 1** - Schéma de la cible de production de neutrons rapides

Les conditions d'irradiation utilisées pour l'analyse des monnaies d'argent par ANRC sont les suivantes : les particules incidentes sont des deutons d'une énergie de 17,5 MeV ; l'intensité du faisceau est de 30  $\mu\text{A}$  ; la durée de l'irradiation est comprise entre 30 s et 2 min pour des monnaies constituées majoritairement

d'argent, et d'une masse comprise entre 0,7 et 2 g. Les échantillons les plus légers, et les plus purs en argent, nécessitent une irradiation plus longue que ceux d'une masse plus importante et qui contiennent davantage de cuivre. Le temps d'irradiation nécessaire pour un échantillon constitué majoritairement d'argent peut être obtenu d'après la formule  $t \text{ (s)} = 50/m \text{ (g)}$ , établie empiriquement grâce à l'expérience acquise au Centre Ernest Babelon.

Le choix de l'énergie des particules incidentes a été défini afin de minimiser les interférences qui peuvent être de deux types : nucléaires et spectrométriques. Dans le cas des interférences nucléaires, deux éléments stables vont produire le même radio-élément. Les interférences spectrométriques sont dues à des raies d'énergie identique, ou à la résolution en énergie du détecteur, qui peut être insuffisante pour séparer deux raies d'énergies voisines.

La seconde étape de l'analyse par ANRC consiste en la mesure des rayonnements  $\gamma$  émis par l'échantillon soumis préalablement au flux de neutrons rapides. L'irradiation de la matière constituant l'échantillon est à l'origine de réactions nucléaires qui entraînent l'émission de rayonnements  $\gamma$ . Ces réactions sont du type  $(n,n')$ ,  $(n,2n)$ ,  $(n,p)$ ,  $(n,\alpha)$ ,  $(n,\gamma)$  et  $(n,3n)$ . L'énergie des rayonnements produits par l'échantillon est caractéristique des radio-isotopes qui en sont à l'origine ; la mesure de l'intensité du signal de chacune des raies correspondant aux radio-isotopes des éléments que l'on souhaite analyser permet de déterminer la composition de l'échantillon.

Les mesures de spectrométrie  $\gamma$  sont effectuées à l'aide d'un détecteur semi-conducteur de germanium. Le détecteur est relié à un préamplificateur, un amplificateur, un convertisseur analogique-numérique, et à un analyseur multi-canal. Un photon est détecté s'il transfère une partie ou la totalité de son énergie à un électron. Le semi-conducteur convertit le rayonnement  $\gamma$  en courant, proportionnellement à l'énergie des photons  $\gamma$  reçus. L'analyseur multi-canal convertit le signal et affiche un spectre d'énergie sous la forme d'un histogramme à 4096 canaux dont la largeur est une bande d'énergie  $\Delta E$ , et dont la hauteur est proportionnelle au nombre de photons mesurés à cette énergie.

Un radio-isotope créé par le bombardement neutronique peut être identifié grâce à l'énergie des rayons  $\gamma$  qu'il émet et à sa période de décroissance. L'identification de chaque rayonnement  $\gamma$  émis par les différents radio-isotopes permet de connaître l'élément qui leur a donné naissance. La mesure de l'activité, c'est-à-dire l'aire du pic photoélectrique, est proportionnelle à la quantité de radio-isotopes correspondants.

Pour la mesure de spectrométrie  $\gamma$ , l'échantillon radioactif est placé sur le détecteur. L'ensemble est entouré d'un château de plomb afin de protéger le détecteur des rayonnements ambiants. Le cristal du détecteur doit être maintenu à très basse température afin de limiter le bruit de fond intrinsèque du dispositif de mesure. Il est donc continuellement refroidi à l'azote liquide.

Les conditions dans lesquelles nos mesures de spectrométrie  $\gamma$  ont été effectuées sont les suivantes. La première mesure commence environ deux heures après l'irradiation. Cette durée d'attente est nécessaire pour que le temps mort<sup>586</sup> du détecteur, qui est proportionnel à l'activité, décroisse suffisamment pour que la mesure des radio-isotopes de courte période soit juste. Une première mesure courte d'environ une heure est donc effectuée, principalement pour le dosage des éléments majeurs constituant les échantillons, soit l'argent et le cuivre dans notre cas. La période de désintégration du radio-isotope  $^{65}\text{Ni}$  généré par le cuivre lors de l'irradiation est de 2,5 h ; il convient donc d'en mesurer le signal quelques heures seulement après l'irradiation au plus tard. Les radio-isotopes caractéristiques des éléments mineurs les plus abondants sont détectés lors d'une seconde mesure de spectrométrie  $\gamma$  d'une durée de quelques heures. Une troisième mesure plus longue permet enfin de doser les éléments mineurs et traces peu abondants, et permet de corriger certaines interférences comme celle entre les radio-isotopes de l'argent et du plomb d'énergie caractéristique identique (279,1 keV). Une quatrième mesure de plusieurs jours peut être effectuée plusieurs semaines après l'irradiation : cette durée permet la décroissance des radio-isotopes de courte période ; on s'affranchit ainsi des interférences de ceux-ci avec d'autres radio-isotopes d'éléments très peu abondants et de période plus longue. La diminution du bruit de fond permet de plus une meilleure sensibilité. Les contraintes d'utilisation du dispositif de mesure de spectrométrie  $\gamma$  utilisé n'ont pas permis d'effectuer une quatrième mesure de manière systématique.

Le Tableau 1 présente les différents radio-isotopes mesurés pour l'analyse des monnaies anciennes à base d'argent. Le bismuth ne peut pas être caractérisé par ANRC : les périodes des radio-isotopes créés par les réactions (n, p) et (n,  $\alpha$ ) sont trop longues pour en permettre la mesure dans les conditions d'irradiation et de mesure qui ont été les nôtres.

---

<sup>586</sup> Le temps mort correspond à la durée pendant laquelle le détecteur ne peut acquérir de signal entre la mesure de deux événements. Un temps mort trop important peut être à l'origine d'une mesure de signal inexacte, et donc entraîner des erreurs dans la composition qui sera déterminée.



Elément	Radio-isotope	Réaction nucléaire	Période du radio-isotope	Energie du rayonnement $\gamma$ (keV)
Ag	$^{106m}\text{Ag}$ $^{105}\text{Ag}$	$^{107}\text{Ag}(n,2n)^{106m}\text{Ag}$ $^{107}\text{Ag}(n,3n)^{105}\text{Ag}$	8,4 jours 41 jours	450,9 ; 717,3 280,3 ; 344,2
Cu	$^{60}\text{Co}$ $^{65}\text{Ni}$	$^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$ $^{65}\text{Cu}(n,p)^{65}\text{Ni}$	5,27 ans 2,5 heures	1332,5 1115,5 ; 1481,8
Sn	$^{117m}\text{Sn}$	$^{118}\text{Sn}(n,2n)^{117m}\text{Sn}$ $^{117}\text{Sn}(n,n')^{117m}\text{Sn}$ $^{116}\text{Sn}(n,\gamma)^{117m}\text{Sn}$	14 jours	159,0
Sb	$^{122}\text{Sb}$	$^{123}\text{Sb}(n,2n)^{122}\text{Sb}$	2,7 jours	564,0
Pb	$^{203}\text{Pb}$	$^{204}\text{Pb}(n,2n)^{203}\text{Pb}$	2,2 jours	279,2
Au	$^{196}\text{Au}$	$^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$	6,2 jours	333,0 ; 355,7
As	$^{74}\text{As}$	$^{75}\text{As}(n,2n)^{74}\text{As}$	17,8 jours	595,7
Zn	$^{65}\text{Zn}$	$^{67}\text{Zn}(n,p)^{67}\text{Cu}$ $^{66}\text{Zn}(n,2n)^{65}\text{Zn}$	61,9 heures 243,8 jours	184,5 1115,5

**Tableau 1** - Radio-isotopes caractéristiques mesurés par spectrométrie  $\gamma$  lors de l'analyse par ANRC.

Le calcul des concentrations en ANRC peut être effectué selon une procédure faisant intervenir des étalons métalliques sous forme de feuilles minces, ou un étalonnage interne (Beauchesne, 1986). Dans les deux cas, on considère que le rapport entre l'activité spécifique d'un élément donné et celle de l'étalon interne est constant, pour des conditions expérimentales identiques. Cela permet de calculer des coefficients d'activité spécifique relative qui sont employés pour déterminer la concentration de chaque élément à partir du signal mesuré pour chaque radio-isotope.

Selon la première procédure, une feuille métallique mince de chacun des éléments que l'on souhaite doser doit être placée sur chaque face de l'échantillon lors de l'irradiation. La teneur de chaque élément est déterminée à partir des rapports de signaux et de masses entre l'échantillon et les feuilles minces constituées de métaux purs. La méthode de l'étalon mince est certes simple en théorie, mais contraignante en pratique : le nombre de mesures de spectrométrie  $\gamma$  est plus important en suivant cette approche, et chacun des éléments dosés doit être disponible sous forme de feuille métallique. Pour la procédure d'étalonnage qui fait intervenir un étalon interne, le postulat de départ est que la somme des teneurs de tous les éléments caractérisés est égale à 100 %. L'incertitude liée à cette approximation peut être considérée comme négligeable dans nos monnaies à base d'argent, à l'intérieur desquelles l'élément le plus abondant parmi ceux qui ne peuvent être analysés est le bismuth, dont la teneur n'excède que très rarement 0,2 %. L'étalon interne doit être un radio-isotope d'un élément relativement

abondant dans les échantillons afin que l'incertitude sur la mesure de son signal soit négligeable. Il s'agit de l'argent dans notre cas.

Le calcul des concentrations pour l'analyse des monnaies d'argent par ANRC est effectué à l'aide d'un programme de calcul développé spécifiquement au Centre Ernest Babelon.

Les limites de détection caractéristiques de l'ANRC ont été calculées pour nos conditions d'irradiation et de mesures de spectrométrie  $\gamma$ . Les limites de détection ont été déterminées à partir d'un signal correspondant à trois fois la racine carrée du bruit de fond mesuré à l'énergie caractéristique du radio-isotope. Les valeurs de ces limites de détection apparaissent dans le Tableau 2.

Elément	Limite de détection (ppm)
Sn	150
Zn	4500
Sb	25
Pb	1200
Au	100
As	120

**Tableau 2** – Limites de détection calculées pour l'ANRC dans nos conditions d'irradiation et de mesures de spectrométrie  $\gamma$ .

## Bibliographie

- Beauchesne, F. et Barrandon, J.-N., 1986. Analyse globale et non destructive des objets archéologiques cuivreux par activation avec des neutrons rapides de cyclotron. *Revue d'Archéométrie*, 10, p. 75-85.
- Guerra, M.F. et Barrandon, J.-N., 1998. Ion beam activation analysis with a cyclotron. In : A. Oddy et M. Cowell (Editeurs), *Metallurgy in Numismatics*. Royal Numismatic Society, London, p. 15-34.
- Meyers, P., 1969. Non-destructive activation analysis of ancient coins using charged particles and fast neutrons. *Archaeometry*, 11, p. 67-84.

## Annexe 2 :

### Comparaison des teneurs en argent déterminées sur la tranche et la face de mêmes monnaies par LA-ICP-MS

Les valeurs correspondant aux points représentés sur la Figure 14 p. 65 apparaissent dans le tableau suivant.

Les références des monnaies carolingiennes concernées sont indiquées, ainsi que leur type monétaire de façon abrégée selon la notation présentée en début de volume. Les teneurs en argent en pourcents déterminées d'après les analyses en profil de concentration par LA-ICP-MS sur la tranche et sur la face des échantillons, ainsi que l'écart relatif entre les deux valeurs, sont indiquées dans les colonnes suivantes.

Les échantillons apparaissent selon l'écart relatif croissant entre les deux teneurs en argent déterminées.

Référence	Type	Face	Tranche	Ecart relatif
<b>BnF 906b</b>	C3	91,9 %	91,77%	0,1 %
<b>Prou 903</b>	L2	84,1 %	84,20%	0,2 %
<b>Prou 905</b>	C3	88,8 %	89,18%	0,4 %
<b>BnF 920e</b>	L2	92,0 %	91,62%	0,5 %
<b>BnF 920c</b>	L2	88,6 %	89,10%	0,6 %
<b>Prou 1001</b>	L3	90,0 %	90,56%	0,7 %
<b>Prou 919</b>	L2	85,1 %	85,97%	1,1 %
<b>BnF 912 bis</b>	C3	92,2 %	90,59%	1,7 %
<b>BnF 920h</b>	Xpe Ven.	83,3 %	85,17%	2,3 %
<b>BnF 920f</b>	L2	78,0 %	79,82%	2,3 %
<b>BnF 920g</b>	Xpe Ven.	81,91%	83,83%	2,3 %
<b>BnF 1032q</b>	L3	88,0 %	90,92%	3,3 %
<b>Prou 918</b>	L2	86,9 %	91,09%	4,9 %
<b>Prou 910</b>	Loth.	79,0 %	85,00%	7,6 %
<b>Prou 568</b>	L3	86,3 %	94,83%	9,9 %
<b>Prou 894</b>	C2	81,7 %	89,84%	10,0 %
<b>Prou 904</b>	Loth.	76,2 %	85,31%	11,9 %
<b>Prou 920</b>	L2	72,6 %	86,12%	18,7 %



# Annexe 3 :

## Comparaison des teneurs déterminées par LA-ICP-MS et par ANRC

Les éléments pour lesquels des teneurs peuvent être déterminées par LA-ICP-MS et par ANRC sont : l'argent (Ag), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), l'arsenic (As), l'étain (Sn), l'antimoine (Sb), l'or (Au) et le plomb (Pb). Les concentrations obtenues par les deux méthodes comparées sont reportées pour tous ces éléments à l'exception du cuivre, complémentaire de l'argent dans les alliages binaires comme ceux constituant les monnaies d'argent analysées.

Les valeurs sont exprimées en pourcents pour l'argent et le cuivre et en ppm pour les autres éléments (1 % = 10000 ppm).

Les échantillons analysés par LA-ICP-MS et par ANRC sont présentés comme suit : un premier regroupement est effectué selon le type de monnaie (almohades, gros tournois, piéforts et carolingiennes). Au sein de chaque groupe, les échantillons sont classés selon leur teneur en argent déterminée par LA-ICP-MS décroissante.



## Les monnaies almohades du 13<sup>e</sup> siècle

	Ag (%)		Zn (ppm)		As (ppm)		Sn (ppm)		Sb (ppm)		Au (ppm)		Pb (ppm)	
	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC
<b>KBR27</b>	97,5%	96,6%	nd	nd	nd	nd	0,06	nd	0,87	nd	19	nd	20022	30200
<b>F10035</b>	97,4%	96,3%	1,5	nd	0,8	nd	0	nd	0,13	nd	62	110	20591	31800
<b>Lav.755</b>	95,0%	94,1%	1,2	nd	nd	nd	6,2	nd	1,4	nd	2472	2900	13544	28300
<b>H3165</b>	94,6%	94,3%	23	nd	1,4	nd	24	nd	1,6	nd	99	140	13097	23300
<b>KBR46</b>	93,7%	92,6%	30	nd	27	nd	187	531	12	nd	6179	6600	15338	29800
<b>Lav.658</b>	93,1%	93,2%	40	nd	33	280	149	122	20	nd	3495	3700	21019	25900
<b>1968-60</b>	91,2%	92,0%	9,4	nd	45	nd	119	136	23	30	10592	11400	8615	15000
<b>Lav. 545</b>	83,3%	84,7%	279	nd	244	280	465	nd	66	70	7577	9180	16847	24800
<b>1970.318</b>	83,3%	84,7%	31	nd	249	247	158	250	175	180	3754	4127	2480	9686
<b>1970.317</b>	80,4%	84,0%	878	nd	674	652	572	732	203	257	3384	4405	4954	11997
<b>764</b>	74,4%	77,3%	14	nd	168	nd	60	nd	339	401	1348	1800	9319	19126
<b>763 128a</b>	71,0%	72,3%	234	120	440	431	262	nd	378	397	583	844	20201	26804
<b>763 120</b>	70,1%	73,1%	159	nd	481	437	331	442	376	385	708	1095	15896	27577
<b>Lav.722</b>	51,1%	55,2%	20	nd	714	680	339	469	627	760	666	900	11431	24600
<b>Lav.721</b>	48,3%	53,3%	55	nd	801	910	327	592	1065	913	1940	2460	8467	8700

## Les monnaies françaises du 13<sup>e</sup> siècle : les gros tournois

	Ag (%)		Zn (ppm)		As (ppm)		Sn (ppm)		Sb (ppm)		Au (ppm)		Pb (ppm)	
	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC
<b>2665</b>	96,2%	95,2%	1,4	nd	1,9	nd	0,17	nd	1,0	nd	2705	2800	8453	21000
<b>Cote 657</b>	95,8%	95,4%	113	nd	18	nd	71	108	31	nd	2851	2721	7855	10491
<b>281</b>	95,6%	95,5%	148	nd	2,7	nd	17	975	4,4	nd	676	753	10551	19316
<b>27</b>	95,5%	96,1%	19	nd	19	nd	21	nd	10	60	1769	1800	8088	9700
<b>17</b>	95,4%	94,8%	3,3	nd	0,67	nd	1,9	nd	0,42	nd	846	1400	12402	20600
<b>2637</b>	95,2%	94,6%	5,0	nd	1,8	nd	5,5	nd	1,7	nd	1445	2140	11308	24100
<b>270</b>	95,1%	94,9%	10	nd	6,0	166	6,1	nd	2,8	nd	6142	7672	7370	14396
<b>29</b>	94,8%	94,8%	7,9	nd	2,9	nd	1,9	nd	001	nd	71	135	16387	23300
<b>2633</b>	94,0%	93,3%	1,2	nd	27	nd	2,8	nd	74	nd	2485	2400	9166	19600
<b>25</b>	93,5%	93,8%	10	nd	3,7	nd	10	nd	3,3	nd	3252	3500	16014	20800
<b>169</b>	91,4%	91,0%	7,3	nd	180	228	27	nd	132	150	1068	1777	13026	28200
<b>Cote 656</b>	91,1%	91,4%	81	nd	179	257	290	370	786	756	2852	3622	7428	16394
<b>176</b>	90,9%	91,5%	48	nd	361	460	55	nd	343	330	260	390	7256	17500
<b>170</b>	80,6%	81,2%	177	nd	423	422	340	342	395	382	1401	2256	15891	22010
<b>172</b>	62,9%	65,7%	410	nd	910	910	593	571	701	950	1997	2490	11366	20700



## Les monnaies françaises du 13<sup>e</sup> siècle : les piéforts

	Ag (%)		Zn (ppm)		As (ppm)		Sn (ppm)		Sb (ppm)		Au (ppm)		Pb (ppm)	
	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC
<b>1655</b>	37,2%	41,4%	1562	nd	568	468	1126	1262	2246	1800	254	426	13796	23677
<b>1653</b>	37,0%	42,7%	1809	nd	271	332	1323	1712	1378	1422	811	1490	9986	22387
<b>1657</b>	36,9%	33,8%	2838	nd	nd	2023	1313	1574	nd	2258	739	871	16185	41654
<b>182</b>	36,4%	32,2%	2,5	nd	3463	2982	395	365	2916	2606	564	687	15261	16653
<b>37</b>	32,1%	32,4%	576	nd	1459	1940	1241	1082	1224	2000	801	780	18203	27300
<b>1665b</b>	32,0%	37,6%	3361	nd	nd	2226	1296	1706	nd	1811	834	1187	9936	26142
<b>1328</b>	30,6%	34,8%	1183	nd	428	564	900	1225	1408	1703	492	936	10678	12925
<b>Mauléon1671</b>	29,7%	33,8%	3577	nd	nd	609	404	1223	nd	1445	733	1148	4149	11982
<b>Poitou1662</b>	29,4%	28,6%	3927	nd	nd	2306	2741	3003	nd	1755	750	1011	11350	31004
<b>Poitou1661</b>	28,0%	33,2%	3765	nd	nd	1776	1785	2294	nd	1312	658	897	13378	23551
<b>Aq1340</b>	28,0%	31,9%	297	nd	4262	3809	1561	1469	2918	3044	734	1045	15486	23846
<b>1341</b>	25,2%	31,5%	437	nd	4900	5058	1094	1293	2503	2758	622	1028	8915	16720
<b>1992.716</b>	25,0%	24,4%	908	nd	3236	2299	1501	1130	2238	2217	547	518	20540	26586
<b>2006.181</b>	24,4%	31,1%	312	nd	2976	3109	818	1031	1450	1558	222	479	7841	20497
<b>117</b>	23,8%	26,3%	2399	nd	1634	1614	1239	1467	1677	2339	523	736	17672	34708
<b>524</b>	23,2%	27,7%	489	nd	2358	2191	937	1107	1997	2272	456	658	12007	18159
<b>2006-182</b>	22,0%	33,6%	425	nd	2066	2076	1165	1922	1412	1887	371	1080	6472	21709

## Les monnaies carolingiennes

	Ag (%)		Zn (ppm)		As (ppm)		Sn (ppm)		Sb (ppm)		Au (ppm)		Pb (ppm)	
	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC
<b>Prou 909</b>	95,8%	96,2%	6,3	nd	1,3	nd	53	nd	3,2	nd	2182	1900	7436	1700
<b>Prou 902</b>	95,2%	95,5%	58	nd	9,7	nd	206	276	5,6	nd	3073	2837	7092	4600
<b>Prou 897</b>	93,4%	93,7%	24	nd	5,0	nd	18	nd	19	nd	1083	1100	7722	13400
<b>Prou 900</b>	92,4%	94,0%	9,9	nd	8,0	nd	26	nd	31	nd	671	800	12091	15000
<b>Prou 916</b>	92,3%	93,9%	622	nd	136	nd	296	252	86	85	2709	3300	3479	2000
<b>Prou 63</b>	92,2%	93,9%	23	nd	5,8	nd	44	nd	10	nd	1930	2056	11506	8109
<b>Prou 907</b>	92,2%	93,2%	202	nd	33	nd	389	680	15	nd	2924	3300	8272	9300
<b>Prou 898</b>	91,9%	93,0%	23	nd	4,3	nd	18	nd	27	nd	3160	3000	6417	6100
<b>Prou 74</b>	90,6%	87,1%	13958	nd	1497	778	4132	4626	299	330	4647	4162	9767	15956
<b>Prou 1000</b>	89,6%	89,1%	198	nd	82	nd	118	nd	46	nd	1052	1037	11974	18000
<b>Prou 443</b>	88,9%	91,3%	1087	nd	50	nd	1086	1028	109	103	2855	3485	8311	19285
<b>Prou 489a</b>	88,8%	89,2%	214	nd	111	nd	1393	2616	315	322	682	895	10088	21448
<b>Prou 905</b>	88,8%	88,7%	17	nd	75	nd	23	nd	89	80	148	230	10268	8600
<b>Prou 796</b>	87,7%	87,3%	14	nd	63	nd	37	nd	115	134	317	447	7710	12700
<b>Prou 72</b>	87,6%	83,8%	496	nd	116	nd	315	318	69	nd	503	648	6017	6900
<b>Prou 315</b>	86,3%	87,2%	53	nd	3,67	nd	791	943	10	nd	66054	63363	5265	7800
<b>Prou 649</b>	86,2%	89,6%	119	nd	15	nd	157	nd	61	nd	3512	6559	7952	15600
<b>Prou 790</b>	85,7%	86,9%	7263	nd	610	nd	364	nd	80	nd	519	1178	7646	15967
<b>Prou 714</b>	85,4%	89,3%	1,9	nd	13	nd	4,0	nd	261	287	215	363	8728	22453
<b>Prou 142</b>	85,3%	86,9%	1516	nd	161	nd	1371	1707	56	58	8554	10017	7229	11600
<b>Prou 774</b>	84,9%	82,2%	18	nd	133	nd	370	400	79	58	441	707	10306	15700
<b>Prou 797</b>	84,9%	86,8%	14	nd	12	nd	18	nd	7,4	nd	398	550	8921	7600
<b>BnF 1976-70</b>	84,5%	84,4%	1809	nd	137	nd	1130	1152	86	73	5606	6061	8349	10900
<b>Prou1029b</b>	84,2%	85,3%	9242	nd	388	nd	1038	1633	83	128	3223	3797	9356	15400
<b>Prou 1029a</b>	84,1%	84,9%	7043	nd	451	529	2743	3301	100	143	8582	8088	14352	20800
<b>Prou 685</b>	82,9%	86,9%	30	nd	20	nd	42	nd	316	281	39	nd	10222	22726
<b>Prou 203</b>	82,4%	82,1%	15674	nd	85	nd	4562	4161	195	198	13991	13383	10895	15500

## Les monnaies carolingiennes (suite)

	Ag (%)		Zn (ppm)		As (ppm)		Sn (ppm)		Sb (ppm)		Au (ppm)		Pb (ppm)	
	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC	LA-ICP-MS	ANRC
<b>Prou 1032a</b>	81,9%	84,3%	2053	nd	553	674	2359	nd	96	122	1755	1947	7583	12800
<b>Prou 58</b>	80,7%	82,3%	6944	9176	37	189	3182	3408	167	175	7010	6688	10061	19262
<b>Prou 42</b>	79,4%	85,5%	1131	nd	97	nd	3376	4032	115	146	8476	9913	8448	7100
<b>Prou 60</b>	78,8%	82,9%	8335	nd	278	nd	6819	6564	289	292	9553	10430	8088	4500
<b>Prou 910</b>	78,7%	83,2%	3382	nd	77	nd	775	nd	68	nd	3645	1852	10041	13800
<b>Prou 690a</b>	77,5%	83,1%	5278	nd	1301	1256	632	770	136	165	975	1398	3613	11100
<b>Prou 920d</b>	75,7%	82,0%	232	nd	656	528	509	366	153	97	916	1218	8395	7800
<b>Prou 998</b>	75,3%	80,8%	2126	nd	569	619	1165	1091	147	114	2918	3357	7826	11200
<b>Prou 919</b>	73,8%	79,9%	15	nd	400	389	67	nd	213	161	244	298	8055	13338
<b>Prou 920</b>	72,6%	76,6%	604	nd	200	nd	386	992	188	227	774	770	10824	21220
<b>Prou 670</b>	72,4%	63,6%	17194	36555	837	707	16235	15890	365	296	1313	3786	17639	20440
<b>Prou 75</b>	70,8%	71,5%	50632	72509	200	nd	550	455	1741	2002	2056	1658	15040	25894
<b>Prou 857</b>	68,7%	72,5%	18381	22493	1088	1101	2784	3579	221	249	1848	2820	8567	12300
<b>Prou 576</b>	67,8%	62,8%	40042	67258	nd	1349	3913	3472	nd	325	8377	9980	7102	13900
<b>Prou 669</b>	66,8%	67,6%	21417	35580	1176	1185	6055	4893	293	298	2353	7052	11007	17043
<b>Prou 78</b>	62,4%	72,3%	29248	30078	1711	1604	2939	3458	276	291	4568	5008	5353	5600
<b>Prou 656</b>	62,2%	63,5%	48359	49325	968	866	1576	2467	445	382	914	1037	4923	13097
<b>Prou 69</b>	55,1%	67,9%	43423	50572	1369	1428	11464	10685	584	591	4309	5120	10023	13900
<b>Prou 46</b>	54,0%	49,0%	89193	89996	901	1033	4947	4787	228	252	2032	1928	9393	15075
<b>Prou 858</b>	46,9%	50,1%	115341	147234	nd	3130	212	1471	nd	191	nd	3171	7291	14300
<b>Prou 189</b>	45,9%	48,5%	62128	61300	1702	2000	5259	4286	412	450	2895	3500	11260	21000
<b>Prou 541</b>	41,9%	49,8%	52902	64140	392	nd	12190	15566	408	402	1903	2521	6360	13641



# Annexe 4 :

## Recensement des analyses antérieures de monnaies similaires à celles de notre *corpus*

Les monnaies répertoriées sont classées selon la chronologie croissante de leur émission puis de leur analyse.

Les informations présentées sont les suivantes : référence abrégée à la publication d'origine (auteur(s), année de publication<sup>587</sup>) ; type d'analyse ; type monétaire ; lieu d'émission ; teneurs en argent, cuivre, or, plomb, zinc, étain, antimoine et bismuth exprimées en pourcents.

Les résultats sont présentés de la même manière que dans leur publication d'origine : la mention « tr » signifie que l'élément est détecté mais ne peut être quantifié ; « nd » est ajouté par certains auteurs que l'élément concerné n'a pas été détecté. L'absence de mention signifie que l'élément n'a été ni quantifié ni détecté.

Certains éléments supplémentaires à ceux que nous rapportons n'ont pas été repris ici : il s'agit de constituants dont la connaissance n'apporte aucune information supplémentaire pour les études de provenance en particulier, et dont la mesure pour certains d'entre eux traduit une méconnaissance du type d'échantillons analysés par les analystes.

Les abréviations utilisées pour la mention des types monétaires sont présentées au début de cette thèse.

Pour les monnaies de la Première période d'émission de Charles le Chauve, le type précisé apparaît selon le classement de MEC p. 231-232.

La variété de type est précisée pour les monnaies au nom de Lothaire.

Les deniers au monogramme carolin dont les analyses sont rapportées par Ilisch et Metcalf et Northover peuvent être rattachés à une période d'après le contexte de leur trouvaille : la première est du Type 3 de Charlemagne, tandis que les autres datent de la fin du règne de Charles le Chauve.

---

<sup>587</sup> Les références complètes aux publications citées apparaissent à la suite du tableau de résultats.



Référence	Type d'analyse	Type monétaire	Lieu d'émission	Ag (%)	Cu (%)	Au (%)	Pb (%)	Zn (%)	Sn (%)	As (%)	Sb (%)	Bi (%)
Metcalf et Northover (1989)	de surface	Pépin le Bref	Reims	89,61	8,04	0,87	1,02	0,37	nd			0,05
		Pépin le Bref	Quentovic	90,15	7,76	0,80	1,00	0,26	nd		tr	
Metcalf et Merrick (1967)	de surface	C2	Melle	93	5	2	tr	tr				
		C2	Dorestad	90	8	2	tr	tr				
Metcalf <i>et al.</i> (1968)	de surface	C2	Melle	94	6	tr	tr					
Metcalf et Northover (1989)	de surface	C2	Lyon	91,61	7,38	0,11	0,67	0,07	nd		0,01	0,14
		C2	Melle	91,92	6,47	0,03	1,45	0,06	nd		nd	0,03
		C2	Mayence	92,66	3,92	0,25	1,61	1,41	nd		0,03	0,05
Bompaire et Depierre (1989)	activation protonique	C2	Tours St Martin	65								
		C2	Paris	61								
		C2	<i>SCI SEPHF</i>	50								
		C2	Troyes	38								
		C2		65,9	29,1	0,1	1,835	0,299	2,412		0,070	0,062
Ilisch <i>et al.</i> (2003)	de surface	C2		74,1	13,9	0,3	3,568	0,134	6,480		0,304	0,131
		C2		71,9	18,6	2	1,563	0,426	4,511		0,101	0,068
		C2	Chartres	97,7	1,6	0	0,489	0,002	0,050		0,011	0,033
		C2	Laon	60,9	34,9	0,4	0,871	1,768	0,354		0,081	0,065
		C2	Le Mans	75,5	22,8	0,4	0,495	0,020	0,053		0,017	0,038
		C2	Paris	95,7	2,1	0,7	0,636	0,015	0,099		0,024	0,077
		C2	Paris	98,1	0,4	0,5	0,256	0,053	0,229		0,035	0,053
		C2	Quentovic	98	0,9	2	0,290	0,079	0,142		0,028	0,045
		C2	St Denis	91,8	1,3	0,6	0,198	5,268	0,120		0,016	0,031
		C2	anonyme	97,6	1	0,3	0,459	0,028	0,145		0,050	0,071
		C2	Limoges	97,7	1,1	0,4	0,346	0,035	0,182		0,016	0,057
		C2	Limoges	78,9	19,4	0,3	0,575	0,152	0,288		0,026	0,064
		C2	Limoges	81,4	16,2	0	0,807	0,127	0,000		0,019	0,060
C2	Limoges	96,7	1,1	0,1	0,198	0,193	0,078		0,018	0,036		
C2	Limoges	96,8	1,7	0,2	0,483	0,083	0,399		0,020	0,051		





Référence	Type d'analyse	Type monétaire	Lieu d'émission	Ag (%)	Cu (%)	Au (%)	Pb (%)	Zn (%)	Sn (%)	As (%)	Sb (%)	Bi (%)
Ilisch <i>et al.</i> (2003)	de surface	C2	Marseille	96,1	2,8	0	0,579	0,000	0,069		0,006	0,168
		C2	Melle	75,8	22,3	0	0,924	0,021	0,000		0,016	0,055
		C2	Melle	95,7	2	0	0,707	0,001	0,000		0,078	0,062
		C2	Melle	93,3	2,6	2,6	0,562	0,000	0,407		0,008	0,142
		C2	Cluses	96,9	1,2	0,5	0,384	0,026	0,119		0,010	0,057
		C2	Cluses	89	7,9	0,6	1,233	0,070	0,075		0,016	0,076
		C2	Cluses	97,1	1	0,5	0,424	0,098	0,371		0,046	0,068
		C2	Cluses	95,4	2,7	0,7	0,265	0,102	0,228		0,038	0,082
		C2	Cluses	97,1	1,5	0,7	0,208	0,063	0,137		0,034	0,051
		C2	Dinant	97,4	1,3	0,7	0,087	0,034	0,125		0,019	0,026
		C2	Dorestad	90,6	3,3	1,5	1,578	0,516	1,763		0,081	0,135
		C2	Dorestad	96,5	2	0,5	0,260	0,052	0,116		0,031	0,050
		C2	Dorestad	92	6,7	0,2	0,751	0,000	0,000		0,012	0,111
		C2	Dorestad	95,9	1,1	0,4	0,191	1,617	0,063		0,011	0,043
		C2	Dorestad	96,7	1	1	0,365	0,182	0,181		0,024	0,077
		C2	Dorestad	95,4	2,3	0,7	0,562	0,016	0,023		0,007	0,050
		C2	Dorestad	95,1	3,6	0,2	0,776	0,000	0,000		0,000	0,066
		C2	Dorestad	97	1,6	0,5	0,202	0,080	0,242		0,027	0,052
		C2	Dorestad	68,8	29,2	0,4	0,600	0,011	0,081		0,006	0,069
		C2	Dorestad	97,5	1,2	0,3	0,302	0,074	0,057		0,038	0,051
		C2	Dorestad	97,2	1,6	0,5	0,143	0,004	0,072		0,015	0,053
		C2	Dorestad	96,1	2,6	0	0,757	0,079	0,000		0,006	0,163
		C2	Dorestad	56,9	40,9	0,2	0,699	0,672	0,113		0,035	0,064
		C2	Dorestad	92,3	5,8	0,5	0,503	0,237	0,128		0,028	0,051
		C2	Dorestad	97	0,9	1,1	0,230	0,099	0,196		0,023	0,073
		C2	Dorestad	95,8	1,8	0,7	0,699	0,345	0,194		0,026	0,076
		C2	Dorestad	95,4	2,9	0,6	0,376	0,065	0,132		0,031	0,070
		C2	Dorestad	66,9	31,7	0,5	0,382	0,070	0,036		0,009	0,039
C2	Dorestad	91,2	3,2	0,3	0,459	0,388	0,057		0,015	0,091		







Référence	Type d'analyse	Type monétaire	Lieu d'émission	Ag (%)	Cu (%)	Au (%)	Pb (%)	Zn (%)	Sn (%)	As (%)	Sb (%)	Bi (%)
Metcalf <i>et al.</i> (1968)	de surface	C3	Pavie	97,5-97,75	2-2,25						0,25	
		C3	Milan	98	2	tr						
Ilisch (2003)	de surface	C3	Melle	87,16	7,74	2,37	0,65	0,680		0	0,091	0,126
		C3	Milan	90,87	6,64	1	0,74	0,040	0,154	0	0,033	0,247
Ilisch <i>et al.</i> 2003	de surface	C3	<i>EX METALLO NOVO</i>	95,51	3,27	1	0,74	0	0	0	0,026	0,065
Mulazzani (1888)	chimique	L1 ou L2	Pavie	93								
Brambilla (1883)	chimique	L2	Pavie	94,4								
Papadopoli (1898)	chimique	L2	Venise	89,8		0,05						
Metcalf et Northover (1989)	de surface	L2	Cambrai	94,61	4,03	0,24	0,96	0,08	nd		nd	nd
		L2	Paris	94,78	3,52	0,36	1,23	0,08	nd		nd	tr
		L2	Rouen	92,69	3,22	0,3	0,57	0,16	nd		nd	tr
Mulazzani (1888)	chimique	L3	indéterminé	92,4								
Prou (1898)	chimique	L3	indéterminé	86,6								
		L3	indéterminé	44,2**								
Gruaz (1922)	chimique	L3	indéterminé	45,5**								
		L3	indéterminé	90,3								
Chenu (1931-32)	chimique	L3	indéterminé	92,6	5,75	0,116	1,39	nd	nd			nd
		L3	indéterminé	81,6	14,97	0,351	1,17	nd	nd			tr
Metcalf <i>et al.</i> (1968)	de surface	L3	indéterminé	96	2	2	tr	tr			tr	
		L3	indéterminé	94,5	3	1,5	1	tr			tr	
		L3	indéterminé	93,5-95	3-3,5	1	1	tr			tr	
		L3	indéterminé	92	5	1	1				tr	
		L3	indéterminé	89,75	7	1,25	1				tr	
Metcalf et Northover (1989)	de surface	L3	indéterminé	92,95	5,57	0,28	0,99	0,15	nd		tr	0,04
		L3	indéterminé	92,47	5,74	0,39	1,28	0,04	nd		tr	0,01
		L3	indéterminé	89,75	8,78	0,22	1,03	0,11	nd		0,02	0,07
		L3	indéterminé	84,57	13,02	0,12	1,33	0,81	nd		0,01	0,09
		L3	indéterminé	85,35	11,83	1,06	1,18	0,48	nd		0,01	0,04



Référence	Type d'analyse	Type monétaire	Lieu d'émission	Ag (%)	Cu (%)	Au (%)	Pb (%)	Zn (%)	Sn (%)	As (%)	Sb (%)	Bi (%)
Metcalf et Northover (1989)	de surface	L3	indéterminé	71,83	23,21	0,48	1,3	3,05	tr		0,01	0,04
Ilisch (2003)	de surface	L3	indéterminé	63,91	33,32	0,55	0,75	0,833	0	0	0,046	0,042
		L3	indéterminé	94,14	4,16	0,25	0,7093	0,0315	0	0	0,0174	0,0994
Papadopoli (1898)	chimique	<i>Xpe Salva Ven.</i>	Venise	70								
Van der Chijs (1866)	chimique	Loth. (temple et nom d'atelier)	Dorestad	16-25								
Metcalf et Northover (1989)	de surface	Loth. (temple et nom d'atelier)	Dorestad	91,14	4,92	1,58	1,58	1,57	nd		tr	0,08
Mulazzani (1888)	chimique	Loth. (atelier dans le champ)	Milan	72								
		Loth. (atelier dans le champ)	Pavie	77,4								
Papadopoli (1898)	chimique	Loth. (atelier dans le champ)	Venise	72								
Metcalf et Northover (1989)	de surface	Loth. (atelier dans le champ)	Dorestad	90,63	5,73	1,75	1,75	0,28	0,24		nd	0,04
		Loth. (atelier dans le champ)	Dorestad (imitation ?)	58,6	33,58	1,97	1,97	4	1,24		0,06	0,04
Metcalf et Northover (1989)	de surface	CC1 MEC 1a	Meaux	86,69	10,49	1,19	0,88	0,71	nd		tr	0,03
		CC1 MEC 1a	Paris	47,87	44,80	0,52	1,98	2,16	2,52		0,07	0,01
		CC1 MEC 1a	Aquitaine	87,56	9,88	0,31	1,30	0,86	nd		nd	0,06
		CC1 MEC 1c	Orléans	87,29	9,75	0,34	1,88	0,66	nd		0,02	0,03
		CC1 MEC 1c	Orléans	48,66	40,29	0,27	1,26	9,23	0,11		0,03	0,04
		CC1 MEC 1c	Orléans	47,76	44,87	0,33	1,25	4,49	1,07		0,05	0,03
		CC1 MEC 1c	Orléans	55,03	37,83	0,46	1,32	4,63	0,57		0,04	0,03
		CC1 MEC 1d	Melle	93,76	4,31	0,86	0,88	0,14	nd		0,01	0,03
		CC1 MEC 1d	Melle	93,34	4,58	0,74	1,14	0,11	nd		0,01	0,05
		CC1 MEC 1d	Melle	92,90	5,48	0,78	0,69	0,07	nd		nd	nd
Metcalf et Northover (1988)	de surface	CC1 MEC 1d	Melle	91,84	6,23	0,67	1,06	0,14	nd		nd	0,04
		CC1 MEC 1d	Melle	92,05	6,38	0,83	0,60	0,11	nd		nd	nd
		CC1 MEC 1d	Melle	91,42	6,63	0,79	1,04	0,08	nd		tr	0,02
		CC1 MEC 1d	Bourges	92,81	4,97	0,84	1,07	0,25	nd		0,01	0,02
		CC1 MEC 1d	Bourges	92,47	5,38	1,03	1,02	0,04	nd		nd	0,02
		CC1 MEC 1d	Bourges	94,04	4,5	0,68	0,66	0,07	nd		0,01	tr
		CC1 MEC 1e	Auxerre	66,16	31,03	0,61	1,72	3,57	0,38		0,04	0,07
		CC1 MEC 1e	Orléans	66,52	29,15	0,39	0,75	3,00	nd		0,03	0,09





Référence	Type d'analyse	Type monétaire	Lieu d'émission	Ag (%)	Cu (%)	Au (%)	Pb (%)	Zn (%)	Sn (%)	As (%)	Sb (%)	Bi (%)
Metcalf et Northover (1988)	de surface	CC1 MEC 1e	Paris	48,27	4,02	0,21	1,27	9,53	0,48		0,08	tr
		CC1 MEC 1e	Sens	71,14	23,87	0,83	1,37	2,44	0,24		0,02	0,04
		CC1 MEC 1e	Tours	58,30	37,86	0,37	1,59	0,79	0,89		0,08	0,05
		CC1 MEC 1e	Tours	75,51	17,13	0,5	1,72	3,95	nd		0,02	0,10
		CC1 MEC 1e	indéterminé	53,35	39,58	0,26	2,47	2,94	1,14		0,04	0,04
Metcalf et Northover (1988)	de surface	CC1 MEC 1e	indéterminé	77,50	19,53	0,63	1,27	1,00	nd		tr	0,03
		CC1 MEC 1e	indéterminé	82,46	13,99	1,06	0,86	1,40	nd		nd	0,05
		CC1 MEC 1e	indéterminé	92,78	4,11	0,73	1,22	1,03	nd		nd	0,08
		CC1 MEC 1e	indéterminé	76,74	19,43	0,4	1,83	1,52	nd		nd	0,05
		CC2 (GDR)	Rennes	45,6								
Prou (1898)	chimique	CC2 (GDR)	Rennes	45,5								
		CC2 (GDR)	Le Mans	94								
		CC2 (GDR)	<i>Curtisasonien</i>	92,8								
		CC2 (GDR)	Angers	89,34	8,52	0,78	1,06	0,28	nd		nd	nd
Metcalf et Northover (1988)	de surface	CC2 (GDR)	Angers	89,14	7,98	0,81	1,18	0,84	nd		nd	0,02
		CC2 (GDR)	Arras	92,25	5,07	1,64	0,74	0,25	nd		nd	0,04
		CC2 (GDR)	Chartres	92,88	4,77	0,75	1,27	0,12	nd		nd	0,01
		CC2 (GDR)	Courcassin	93,73	4,1	0,85	1,23	0,07	nd		nd	0,01
		CC2 (GDR)	Laon	92,74	5,38	0,69	0,97	0,13	nd		tr	0,03
		CC2 (GDR)	Le Mans	90,68	7,15	0,82	1,19	0,01	nd		nd	0,02
		CC2 (GDR)	Le Mans	90,55	7,38	0,91	0,93	0,17	nd		nd	0,02
		CC2 (GDR)	Palais	62,48	32,24	0,51	1,29	1,58	1,78		0,04	0,02
		CC2 (GDR)	Paris	93,84	4,15	0,61	1,25	0,07	nd		nd	0,01
		CC2 (GDR)	Rennes	91,19	6,8	0,57	0,98	0,4	nd		nd	0,04
		CC2 (GDR)	Rennes	86,01	11,48	0,57	0,95	1,11	nd		nd	0,01

## Bibliographie spécifique à l'Annexe 4

- Bompaire, M. et Depierre, G., Le trésor carolingien de Dijon, rue du Chapeau Rouge, Bulletin de la Société Française de Numismatique, 1989, p. 577-581.
- Brambilla, C., Monete di Pavia raccolte ed ordinatamente dichiarate, 1883, Pavie, 502 p.
- Chenu, P., Un dépôt de monnaies carolingiennes dans le département du Cher, Mémoires de la Société historique, littéraire et scientifique du Cher, 1931-1932, p. 103-126.
- Gruaz, J., Le trésor d'Herminches et les temps carolingiens, Revue Historique Vaudoise, 1922, p. 193-212.
- Ilisch, L., Dirham und Rappenpfennig. Mittelalterliche Münzprägung im Bergbauregionen, Bonn, 2003, p. 146-147.
- David Michael METCALF et Peter NORTHOVER, Carolingian and Viking coins from the Cuerdale hoard: an interpretation and comparison of their metal contents *NC*, 1988, p. 97-116.
- Metcalf, D.M. et Northover, P., Coinage Alloys of the Time of Offa and Charlemagne to c.864, *Numismatic Chronicle*, 1989, p. 101-120.
- Metcalf, D.M. et Merrick, J., Studies in the composition of early medieval coins, *Numismatic Chronicle* (7), 1967, p. 217-231.
- Metcalf, D.M., Merrick, J., et Hamblin, L.K., Studies in the composition of early medieval coins, *Minerva Numismatic Handbooks* (3), 1968.
- Mulazzani, G., Studi economici, *Rivista Italiana di Numismatica* (1), 1888, p. 41-72.
- Papadopoli, N., Le monete di Venezia, discrete ed illustrate da Nicolo Papadopoli, t. 1, Venezia, 1893, 425 p.
- Prou, M., Note sur le titre de quelques deniers des IX<sup>e</sup> et XI<sup>e</sup> siècles essayés à la Monnaie, *Gazette Numismatique* (2), 1898, p. 227-232.
- Van der Chijs, P.O., De Munten der Frankische- en Duitsch-Nederlandische Vorsten, Teyler's Tweede Genootschap, 1866.

# Annexe 5 :

## Résultats des analyses des rapports isotopiques du plomb

Les analyses portant sur des monnaies carolingiennes et arabes réalisées à notre demande ont été effectuées, à partir de micro-prélèvements, par TIMS (Time Ionization Mass Spectrometry) au Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) d'Orléans. La procédure employée est décrite dans C. Pomiès, A. Cocherie, C. Guerrot, E. Marcoux et, J. Lancelot, Assessment of the precision and accuracy of lead-isotope ratios measured by TIMS for geochemical applications: example of massive sulphide deposits (Rio Tinto, Spain), *Chemical Geology*, 144, 1-2, pp.137-149.

La précision des mesures pour ces valeurs est la suivante :

La précision interne sur la mesure est généralement inférieure à 0,01% (2 sigma) sur tous les rapports.

La reproductibilité externe (2 sigma) est de 0.12% pour le rapport  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ , 0,16% pour le rapport  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  et 0.22% pour le rapport  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ .

Le fractionnement est de 0,13%/u.m.a.

## Les rapports isotopiques du plomb dans les monnaies carolingiennes de Melle

Référence	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$
<b>Prou 796</b>	18,5002	15,6809	38,6942	2,0916	0,8476	2,4676
<b>Prou 797</b>	18,4796	15,6741	38,5916	2,0883	0,8482	2,4621
<b>Prou 726</b>	18,4900	15,6821	38,6137	2,0884	0,8481	2,4623
<b>Prou 727</b>	18,4959	15,6804	38,6339	2,0888	0,8478	2,4639
<b>Prou 696</b>	18,4794	15,6748	38,5787	2,0877	0,8482	2,4612
<b>Prou 698</b>	18,4905	15,6802	38,5967	2,0874	0,8480	2,4615
<b>Prou 699</b>	18,4890	15,6760	38,5914	2,0873	0,8479	2,4618
<b>Prou 700</b>	18,4996	15,6585	38,5677	2,0848	0,8464	2,4631
<b>Prou 701</b>	18,4818	15,6664	38,5636	2,0866	0,8477	2,4616
<b>Prou 703</b>	18,4857	15,6836	38,6021	2,0882	0,8484	2,4613
<b>Prou 705</b>	18,4815	15,6830	38,6038	2,0888	0,8486	2,4615
<b>BnF 705a</b>	18,4611	15,6413	38,4970	2,0853	0,8473	2,4613
<b>Prou 706</b>	18,4836	15,6728	38,5854	2,0875	0,8479	2,4620
<b>Prou 707</b>	18,5007	15,6599	38,5720	2,0849	0,8464	2,4632
<b>Prou 708</b>	18,5011	15,6689	38,5928	2,0860	0,8469	2,4630

**Les rapports isotopiques du plomb  
dans les deniers carolingiens du Type 2 de Louis le Pieux  
et vénitiens frappés selon ce type**

Référence	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$
<b>Prou 79</b>	18,5488	15,6803	38,6747	2,0851	0,8454	2,4665
<b>Prou 903</b>	18,5364	15,6711	38,5366	2,0790	0,8454	2,4591
<b>Prou 909</b>	18,4666	15,6581	38,6014	2,0903	0,8479	2,4653
<b>Prou 918</b>	18,5379	15,6501	38,4268	2,0729	0,8442	2,4554
<b>BnF 920c</b>	18,5799	15,6647	38,4995	2,0721	0,8431	2,4577
<b>BnF 1982-63</b>	18,5168	15,6544	38,3939	2,0735	0,8454	2,4526

**Les rapports isotopiques du plomb  
dans les monnaies arabes**

Référence	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$
<b>Lavoix 777</b>	18,4363	15,6313	38,2178	2,0730	0,8479	2,4450
<b>BnF 1970-335</b>	18,0504	15,6123	38,1970	2,1161	0,8649	2,4466
<b>Lavoix 778</b>	18,3647	15,6653	38,5884	2,1012	0,8530	2,4633
<b>Lavoix 779</b>	18,9356	15,7123	39,1796	2,0691	0,8298	2,4936
<b>Lavoix 781</b>	18,3391	15,6368	38,4606	2,0972	0,8527	2,4597
<b>Lavoix 787</b>	18,3749	15,6474	38,5205	2,0963	0,8516	2,4618
<b>Lavoix 803</b>	18,1667	15,6315	38,3028	2,1084	0,8605	2,4504
<b>BnF 1965-171</b>	18,1572	15,6423	38,3246	2,1107	0,8615	2,4501
<b>Lavoix 859</b>	18,5248	15,6528	38,6719	2,0876	0,8450	2,4706
<b>Lavoix 861</b>	18,9137	15,7102	39,1095	2,0678	0,8306	2,4895

## Les rapports isotopiques du plomb dans les galènes de Melle

Ces résultats sont repris d'après la publication de F. Téreygeol, S. Hoelzl et P. Horn, Le monnayage de Melle au haut Moyen Age : état de la recherche, Bulletin de l'Association des Archéologues de Poitou-Charentes, 34, pp. 49-56. Ils ont été obtenus par TIMS (Time Ionization Mass Spectrometry) à Munich par P. Horn et S. Hoelzl.

Les rapports isotopiques présentés dans cette publication sont les suivants :  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ;  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ;  $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  ;  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ . Ces valeurs ont été combinées entre elles afin de permettre une présentation identique à celle proposée pour les analyses réalisées à notre demande par le BRGM.

La précision des valeurs publiées par Téreygeol *et al.* Est indiquée de la manière suivante p. 51 : « La marge d'erreur pour les rapports  $\text{Pb}206/207$  et  $\text{Pb}208/207$  est de 0,05 %, de 0,1 % pour le rapport  $\text{Pb}206/204$  et de 0,15 % pour le rapport  $\text{Pb}207/204$ . ».

Référence	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$
Galène TDF1	18,45074	15,63953	38,47246	2,08513	0,84764	2,45993
Galène TDF2	18,46785	15,65628	38,50944	2,08532	0,84776	2,45981
Galène Ariagnee 1	18,45737	15,64318	38,47518	2,08452	0,84753	2,45953
Galène Ariagnee 2	18,47691	15,65466	38,49966	2,08356	0,84726	2,45919
Galène Tublier 1	18,48442	15,65110	38,51673	2,08371	0,84672	2,46092
Galène Tublier 2	18,49451	15,67845	38,59878	2,08705	0,84774	2,46191
Galène Mouchedune 1	18,45558	15,64298	38,46421	2,08417	0,84760	2,45890
Galène Mouchedune 2	18,49274	15,67999	38,58187	2,08644	0,84790	2,46071
Galène Noblette 1	18,45816	15,64940	38,47280	2,08433	0,84783	2,45842
Galène Noblette 2	18,46488	15,64137	38,42146	2,08078	0,84709	2,45639
G310	18,48000	15,68800	38,62856	2,09024	0,84892	2,46224
G Martin	18,48900	15,68000	38,64493	2,09024	0,84807	2,46469

# Annexe 6 :

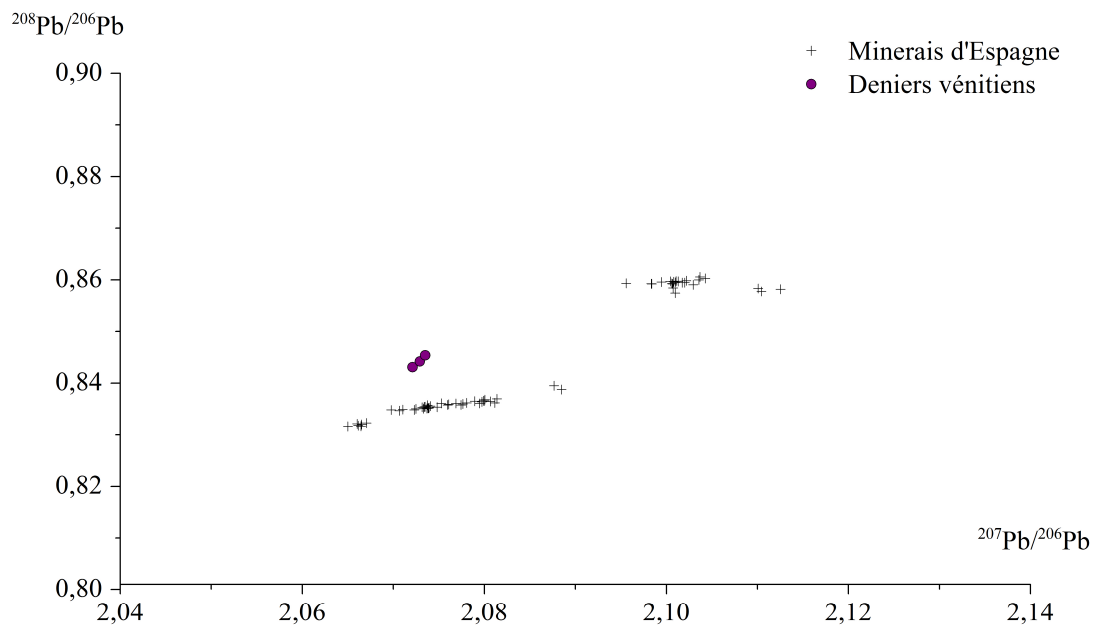
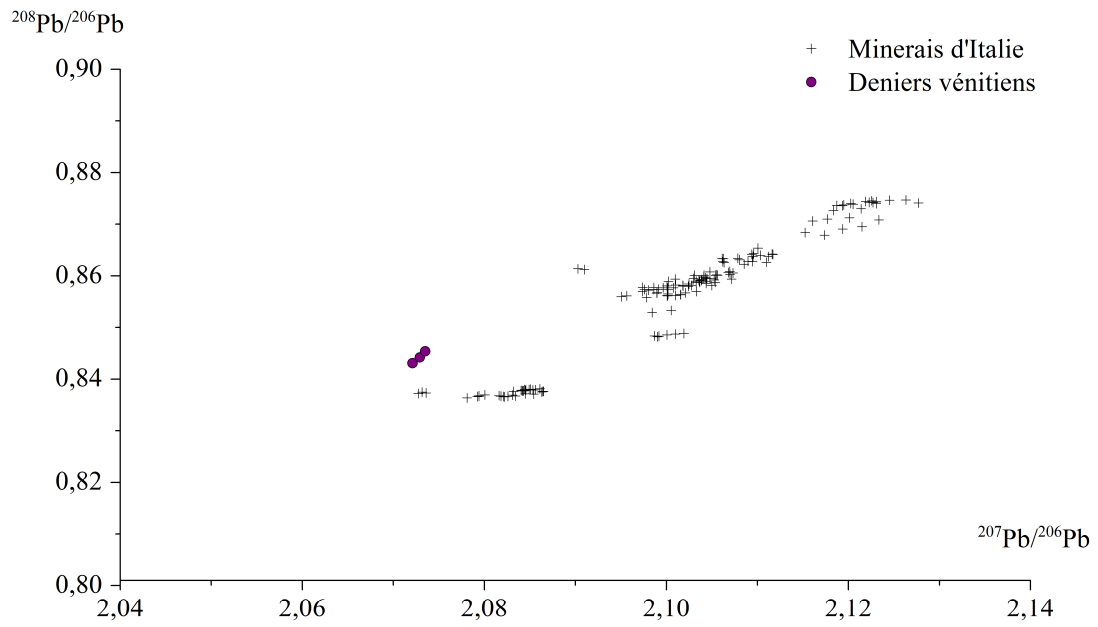
## Comparaison de la signature isotopique du plomb des deniers vénitiens avec celles des bases de données

Les rapports isotopiques du plomb déterminés dans le cadre de cette thèse pour trois deniers vénitiens frappés selon le Type 2 de Louis le Pieux (818-822/3) ont été comparés à ceux disponibles dans la littérature.

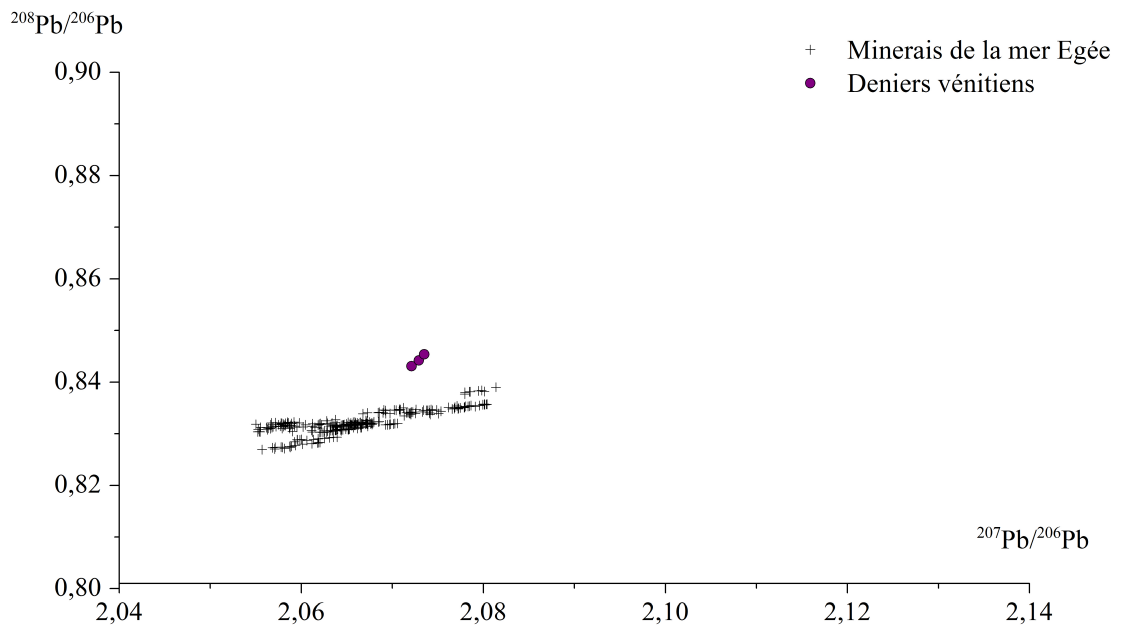
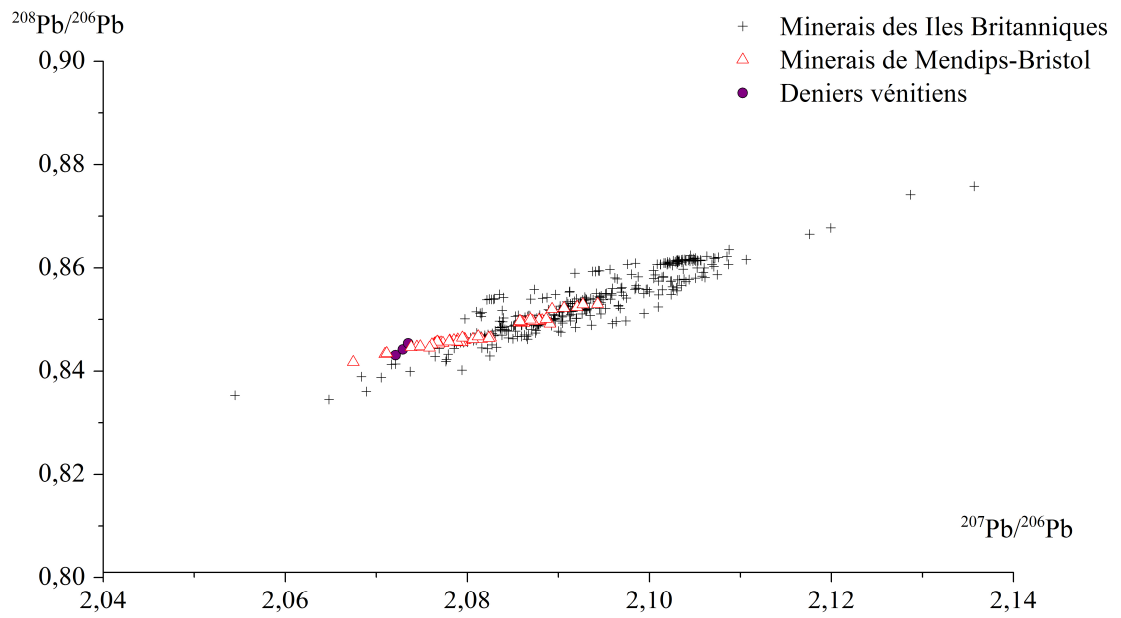
Les bases de données publiées régulièrement dans la revue *Archaeometry* par Stos-Gale, Gale et leurs collaborateurs ont été utilisées. Les zones concernées sont l'Espagne et l'Italie, les Iles Britanniques, la région de la mer Egée, Chypre et la Bulgarie. Sur chacun des graphiques, les points correspondant aux deniers de Venise sont différenciés des autres. Les différents gisements dont les résultats sont présentés dans une même publication ne sont pas différenciés, à l'exception de ceux de Mendips-Bristol qui présentent une similitude de leur signature avec l'argent de Venise.

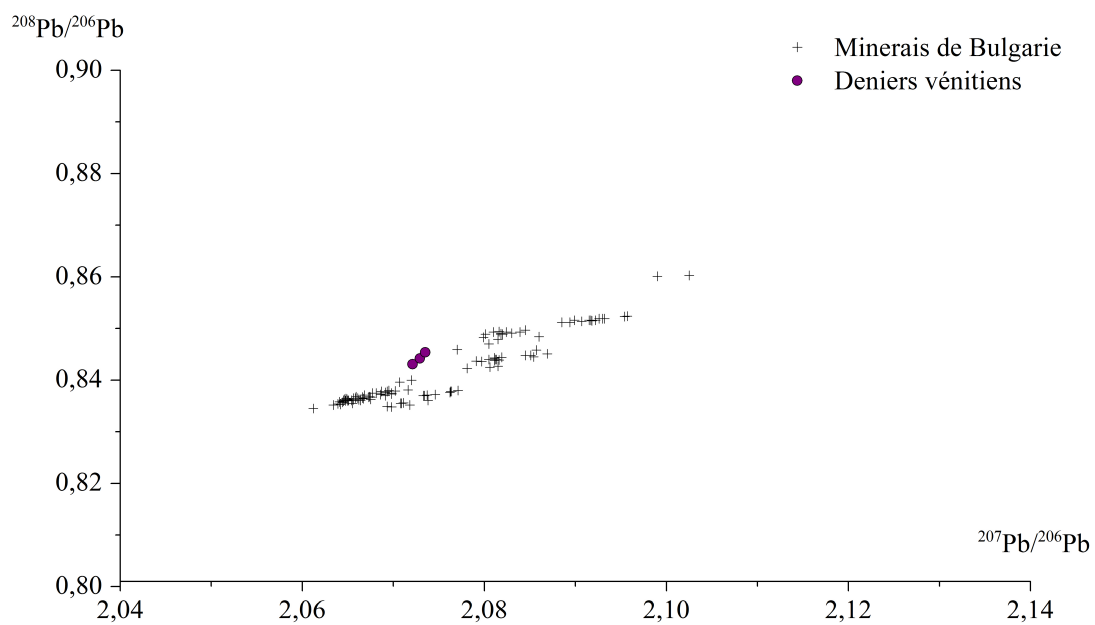
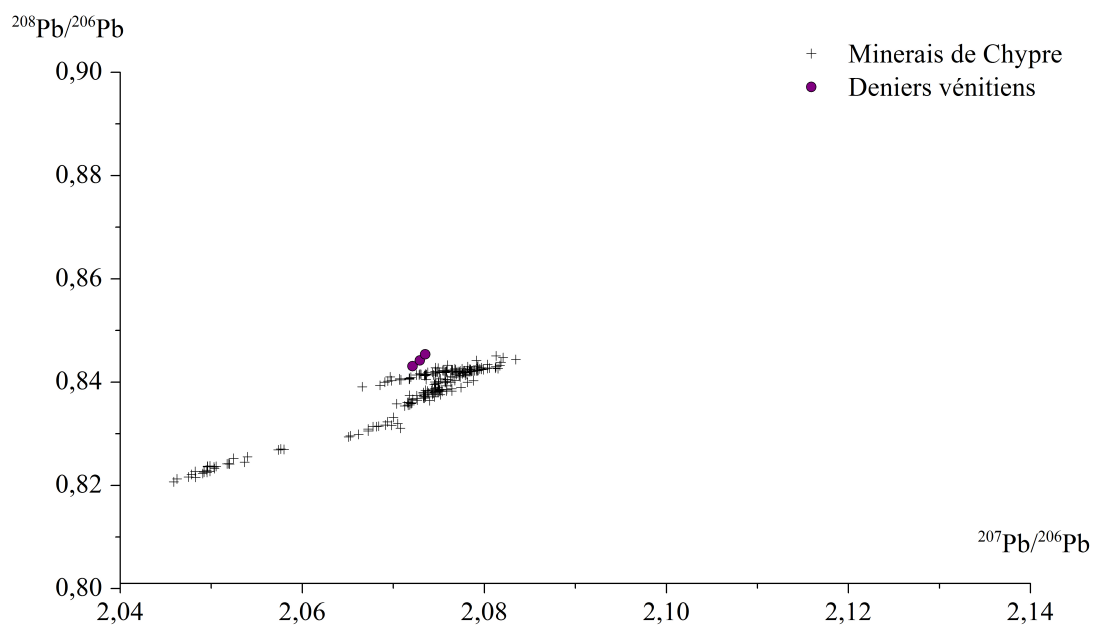
Les valeurs reportées sur nos graphiques sont reprises d'après les publications suivantes :

- Pour l'Italie et l'Espagne : Zofia A. Stos-Gale, Noel H. Gale, Judy Houghton et R. J. Speakman, Lead isotope data from the Isotrache laboratory, Oxford: *Archaeometry Database 1, Ores from the Western Mediterranean*, *Archaeometry*, 37:2, pp. 407-415.
- Pour les Iles Britanniques : Zofia A. Stos-Gale, Noel H. Gale, Judy Houghton, R. J. Speakman et Rohl, B.M., Lead isotope data from the Isotrache laboratory, Oxford: *Archaeometry Database 2, Galena from Britain and Ireland*, *Archaeometry*, 1996, 38:1, pp. 165-180.
- Pour la mer Egée : Zofia A. Stos-Gale, Noel H. Gale, N. Annetts, Lead isotope data from the Isotrache laboratory, Oxford: *Archaeometry Database 3, Ores from the Aegean, Part 1*, 1996, *Archaeometry*, 38:2, pp. 381-390.
- Pour Chypre : Zofia A. Stos-Gale, Noel H. Gale, G. Maliotis et N. Annetts, Lead isotope data from the Isotrache laboratory, Oxford: *Archaeometry Database 4, Ores from Cyprus*, 1997, *Archaeometry*, 39:1, pp. 237-246.
- Zofia A. Stos-Gale, Noel H. Gale, N. Annetts, T. Todorov, P. Lilov, A. Raduncheva et I. Panayotov, Lead isotope data from the Isotrache laboratory, Oxford: *Archaeometry Database 5, ores from Bulgaria, 1*, *Archaeometry*, 40:1, pp. 217-226.









# Annexe 7 :

## Catalogue simplifié des monnaies arabes analysées

Les références aux monnaies provenant de la collection de monnaies orientales du Cabinet des Médailles de la Bibliothèque nationale de France apparaissent de la manière suivante :

- Lavoix X.XXX pour les monnaies référencées dans le catalogue des monnaies arabes de la BnF de Lavoix. Le premier chiffre indique le volume de cet ouvrage : 1., pour le premier volume qui concerne les califes orientaux<sup>588</sup> ; 2., pour le deuxième volume qui porte sur l'Espagne et l'Afrique<sup>589</sup>. Le nombre qui suit indique la référence de la monnaie dans le volume concerné.
- BnF XXX pour les acquisitions ultérieures de cette collection qui ne figurent pas dans le catalogue de Lavoix.

Les monnaies sont classées tout d'abord d'après leur mode de sélection : en premier lieu, les exemplaires sélectionnés d'après les trouvailles recensées par McCormick<sup>590</sup>. La référence des monnaies dans cet ouvrage est mentionnée pour les exemplaires concernés. En deuxième lieu, les dirhams sélectionnés d'après la connaissance de l'activité minière dans le monde arabe durant le haut Moyen Age. Au sein de chaque groupe, les monnaies sont classées par année d'émission croissante.

---

<sup>588</sup> Lavoix, H., 1887, Catalogue des monnaies musulmanes de la Bibliothèque Nationale. Khalifes orientaux, Paris, 548 p.

<sup>589</sup> Lavoix, H., 1891, Catalogue des monnaies musulmanes de la Bibliothèque Nationale. Espagne et Afrique, Paris, 571 p.

<sup>590</sup> Voir l'Appendice 3 dans McCormick, M., 2001. Origins of the European Economy: Communications and commerce, AD-300-900, Cambridge University Press, Cambridge, 1101 p.

Référence		Autorité émettrice
Photographie du droit	Photographie du revers	Calife (ou émir pour l'Espagne Omeyyade) Années de règne A.D.
Année d'émission (A.H. et A.D.)		Lieu d'émission
masse	module	
	Teneur en argent	

Toutes les photographies de monnaies sont à l'échelle 1:1.

La masse est donnée en grammes et le module en millimètres.

La référence des monnaies considérées comme fausses suite à leur analyse apparaît en rouge, ainsi que la teneur en argent.

Le détail des légendes ne figure pas dans ce catalogue simplifié.

Les monnaies arabes sélectionnées  
d'après les trouvailles recensées en Occident  
par M. McCormick

**Lavoix 1.276**



92 AH (710/1 AD) -  
m=2,78 g Ø=27 mm Ag : 96,3 %

***Califat Omeyyade***

Al Walid ibn 'Abd al-Malik  
(705-715)

Dimashq

**Lavoix 1.250**



95 AH (713/4 AD) McCormick A 6  
m=2,55 g Ø=26 mm Ag : 96,3 %

***Califat Omeyyade***

Al Walid ibn 'Abd al-Malik  
(705-715)

Al Tayrama

**Lavoix 1.246**



96 AH (714/5 AD) McCormick A 12  
m=2,95 g Ø=25 mm Ag : 93,3 %

***Califat Omeyyade***

Al Walid ibn 'Abd al-Malik  
(705-715)

Istakhr

**Lavoix 1.579**



132 AH (749/50 AD) -  
m=2,77 g Ø=23 mm Ag : 99,0 %

***Califat Abbasside***

Al Saffah  
(750-754)

Kufa

**Lavoix 1.624**



145 AH (762/3 AD) -  
m=2,81 g Ø=25 mm Ag : 95,8 %

***Califat Abbasside***

Al Mansur  
(764-775)

Al Basra

**Lavoix 1.649**



149 AH (766/7 AD) -  
m=2,90 g Ø=26 mm Ag : 99,0 %

***Califat Abbasside***

Al Mansur  
(764-775)

Al Muhammadiya

**Lavoix 1.707**



161 AH (777/8 AD) A 41  
m=2,69 g Ø=24 mm Ag : 99,3 %

***Califat Abbasside***

Al Mahdi  
(775-785)

Al 'Abbasiya

**Lavoix 1.698**



165 AH (781/2 AD) A 35.10  
m=2,74 g Ø=26 mm Ag : 97,1 %

***Califat Abbasside***

Al Mahdi  
(775-785)

Beda'a

**Lavoix 1.712**



166 AH (782/3 AD)

m=2,65 g    Ø=23 mm



A 23 1.a

Ag : 92,5 %

***Califat Abbasside***

Al Mahdi  
(775-785)

Al 'Abbasiya

**Lavoix 1.739**



170 AH (786/7 AD)

m=2,79 g    Ø=25 mm



A 5

Ag : 93,0 %

***Califat Abbasside***

Al Hadi  
(785-786)

Ifriqiya

**Lavoix 1.806**



170 AH (786/7 AD)

m=2,27 g    Ø=27 mm



A 26

Ag : 96,6 %

***Califat Abbasside***

Haroun al-Rashid  
(786-809)

Al 'Abbasiya

**Lavoix 2.26**



174 AH (790/1 AD)

m=1,80 g    Ø=27 mm



A 25

Ag : 14,6 %

***Espagne Omeyyade***

Hashim ibn Abd al-Raman  
(788-796)

Al Andalus



**Lavoix 1.776**



175 AH (791/2 AD)      A 35 5-6  
m=2,29 g    Ø=23 mm      Ag : 90,1 %

***Califat Abbasside***

Haroun al-Rashid  
(786-809)

Ifriqiya

**Lavoix 1.841**



191 AH (806/7 AD)      A 21  
m=2,91 g    Ø=20 mm      Ag : 99,1 %

***Califat Abbasside***

Haroun al-Rashid  
(786-809)

Madinat al Salam

**Lavoix 2.44**



196 AH (811/2 AD)      A 9  
m=2,68 g    Ø=26 mm      Ag : 96,9 %

***Espagne Omeyyade***

Al Hakam ibn Hashim  
(796-822)

Al Andalus

**Lavoix 1.904**



204 AH (819/20 AD)      A 15.2  
m=2,87 g    Ø=25 mm      Ag : 77,6 %

***Califat Abbasside***

Al Mamun  
(813-833)

Isfahan

### Lavoix 2.94



229 AH (843/4 AD)      A 4  
m=2,27 g    Ø=24 mm      Ag : 95,8 %

### *Espagne Omeyyade*

Abd Al Rahman  
(822-852)

Al Andalus

### Lavoix 1.983



252 AH (866/7 AD)      A 28.1  
m=2,87 g    Ø=25 mm      Ag : 99,4 %

### *Califat Abbasside*

Al Mutamid  
(870-892)

Arminiya

### Lavoix 1.987



253 AH (867/8 AD)      A 42  
m=2,81 g    Ø=23 mm      Ag : 95,6 %

### *Califat Abbasside*

Al Mu'tadhid Billah

Samarqand

### Lavoix 1.1060



282 AH (895/6 AD)      A 14.13  
m=3,11 g    Ø=23 mm      Ag : 97,6 %

### *Califat Abbasside*

Al Mu'tadhid Billah

Madinat al Salam

Les monnaies arabes sélectionnées  
d'après la connaissance de la production minière  
dans le Califat Abbasside

**Lavoix 1.802**



172 AH (788/9 AD)

m=2,63 g    Ø=24 mm    Ag : 95,9 %

***Califat Abbasside***

Haroun al-Rashid  
(786-809)

Sijistan

**BnF 1.778bis**



174 AH (790/1 AD)

m=2,73 g    Ø=27 mm    Ag : 95,3 %

***Califat Abbasside***

Haroun al-Rashid  
(786-809)

Al Basra

**Lavoix 1.777**



174 AH (790/1 AD)

m=2,30 g    Ø=23 mm    Ag : 79,7 %

***Califat Abbasside***

Haroun al-Rashid  
(786-809)

Ifriqiya

**Lavoix 1.779**



181 AH (797/8 AD)

m=3,00 g    Ø=24 mm    Ag : 98,8 %

***Califat Abbasside***

Haroun al-Rashid  
(786-809)

Al Basra

**Lavoix 1.781**



182 AH (798/9 AD)

m=2,60 g    Ø=23 mm    Ag : 96,2 %

***Califat Abbasside***

Haroun al-Rashid  
(786-809)

Balkh

**Lavoix 1.782**



184 AH (800/1 AD)

m=2,87 g    Ø=23 mm    Ag : 94,4 %

***Califat Abbasside***

Haroun al-Rashid (786-809)

Balkh

**Lavoix 1.783**



185 AH (801/2 AD)

m=2,87 g    Ø=25 mm    Ag : 93,1 %

***Califat Abbasside***

Haroun al-Rashid  
(786-809)

Balkh

**Lavoix 1.787**



190 AH (805/6 AD)

m=2,91 g    Ø=24 mm    Ag : 99,2 %

***Califat Abbasside***

Haroun al-Rashid  
(786-809)

Balkh

**BnF 1.848bis**



190 AH (805/6 AD)

m=2,98 g    Ø=25 mm    Ag : 97,8 %

***Califat Abbasside***

Haroun al-Rashid  
(786-809)

Shash

**Lavoix 1.848**



190 AH (805/6 AD)

m=2,88 g    Ø=25 mm    Ag : 98,3 %

***Califat Abbasside***

Haroun al-Rashid  
(786-809)

Shash

**BnF 1970.335**



193 AH (808/9 AD)

m=2,83 g    Ø=23 mm    Ag : 99,4 %

***Califat Abbasside***

Haroun al-Rashid  
(786-809)

Boukhara

**BnF 1974.570.30**



193 AH (808/9 AD)

m=2,91 g    Ø=25 mm    Ag : 99,4 %

***Califat Abbasside***

Haroun al-Rashid  
(786-809)

Boukhara

**BnF 1974.521**



193 AH (808/9 AD)

m=2,91 g    Ø=25 mm    Ag : 96,7 %

***Califat Abbasside***

Haroun al-Rashid  
(786-809)

Boukhara

**Lavoix 1.778**



193 AH (808/9 AD)

m=3,03 g    Ø=23 mm    Ag : 98,9 %

***Califat Abbasside***

Haroun al-Rashid  
(786-809)

Boukhara

**BnF 1965.171**



193 AH (808/9 AD)

m=2,89 g    Ø=24 mm    Ag : 98,8 %

***Califat Abbasside***

Haroun al-Rashid  
(786-809)

Samarqand

**Lavoix 1.803**



193 AH (808/9 AD)

m=2,84 g    Ø=23 mm    Ag : 98,9 %

***Califat Abbasside***

Haroun al-Rashid  
(786-809)

Samarqand

**Lavoix 1.861**



193 AH (808/9 AD)

m=2,80 g    Ø=21 mm    Ag : 98,5 %

***Califat Abbasside***

Al Amin  
(809-813)

Madinat al Salam

**Lavoix 1.858**



194 AH (809/10 AD)

m=2,81 g    Ø=22 mm    Ag : 98,1 %

***Califat Abbasside***

Al Amin  
(809-813)

Balkh

**Lavoix 1.857**



194 AH (809/10 AD)

m=2,45 g    Ø=23 mm    Ag : 99,2 %

***Califat Abbasside***

Al Amin  
(809-813)

Boukhara

**Lavoix 1.859**



194 AH (809/10 AD)

m=2,92 g    Ø=22 mm    Ag : 99,7 %

***Califat Abbasside***

Al Amin  
(809-813)

Al Muhammadiyah



# Annexe 8 :

## Résultats des analyses élémentaires de monnaies arabes par LA-ICP-MS

Les résultats des analyses par LA-ICP-MS pratiquées sur les monnaies arabes sont séparés en deux tableaux distincts : d'une part, les exemplaires sélectionnés d'après l'étude des trouvailles de monnaies d'argent arabes du haut Moyen Age de McCormick ; d'autre part, ceux choisis d'après la connaissance de la production d'argent dans le Califat Abbasside autour de 800.

Les teneurs en argent et en cuivre sont exprimées en pourcents, tous les autres éléments en ppm (1 % = 10000 ppm).

La référence de la monnaie pour laquelle l'analyse suggère qu'il pourrait s'agir d'un faux apparaît en rouge, ainsi que sa teneur en argent.

nd : non détecté.



## Les monnaies sélectionnées d'après les trouvailles recensées en Occident par M. McCormick

	Ag	Cu	Fe	Ni	Zn	As	Se	Ru	Rh	Pd	Cd	In	Sn	Sb	Te	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Pb	Tl	Bi
<b>Lavoix 1.276</b>	96,3%	2,0%	nd	2,9	25	1,0	nd	0,14	0,89	3,5	1,6	0,41	108	2,2	2,0	nd	nd	1,9	8356	594	7279	0,08	49
<b>Lavoix 1.250</b>	96,3%	2,5%	nd	0,42	39	24	nd	0,49	0,40	1,5	0,42	0,21	54	2,3	7,3	nd	nd	0,29	1402	394	7477	0,11	2389
<b>Lavoix 1.246</b>	93,3%	4,0%	60	8,0	59	47	nd	2,2	1,0	3,5	0,67	0,29	69	3,8	1,5	nd	nd	1,1	3205	357	23274	0,12	323
<b>Lavoix 1.579</b>	99,0%	0,2%	30	1,3	25	0,4	nd	0,29	0,09	0,31	0,18	0,02	nd	0,38	3,9	nd	nd	nd	5343	404	870	0,04	570
<b>Lavoix 1.624</b>	95,8%	2,5%	7,3	1,1	19	0,35	nd	0,13	1,0	3,6	0,87	0,03	0,58	0,10	11	nd	nd	0,97	4000	677	10526	0,13	1763
<b>Lavoix 1.649</b>	99,0%	0,3%	6,7	0,36	10	0,86	nd	0,12	0,19	1,5	0,54	0,03	0,41	0,13	6,5	nd	nd	0,38	1246	588	4469	0,59	1331
<b>Lavoix 1.707</b>	99,3%	0,1%	nd	0,78	6,9	2,4	nd	0,35	0,07	0,50	0,06	0,03	1,2	0,37	0,36	nd	nd	0,15	0,35	717	4602	0,01	2,0
<b>Lavoix 1.698</b>	97,1%	2,3%	nd	4,3	1,1	4,5	nd	0,43	0,31	0,92	0,12	0,02	1,1	0,23	0,29	nd	nd	0,08	0,60	178	6268	nd	5,1
<b>Lavoix 1.712</b>	92,5%	6,3%	nd	3,6	2,3	23	nd	2,4	1,3	2,6	0,17	0,05	5,0	3,7	0,32	nd	nd	0,05	0,22	414	11173	nd	6,5
<b>Lavoix 1.739</b>	93,0%	6,1%	47	68	73	61	nd	0,30	1,8	2,8	0,37	1,6	399	17	2,6	nd	nd	0,28	1652	391	6016	0,12	183
<b>Lavoix 1.806</b>	96,6%	2,3%	nd	16	0,97	19	nd	0,08	0,96	2,2	0,17	0,05	0,89	1,0	0,56	nd	nd	0,02	nd	1082	10070	nd	4,3
<b>Lavoix 26</b>	<b>14,6%</b>	85,1%	230	169	15	318	22	0,14	6,6	7,1	0,05	1,5	257	268	0,3	nd	nd	0,04	105	327	1403	0,01	272
<b>Lavoix 1.776</b>	90,1%	8,0%	21	22	7,8	20	2,7	0,20	2,5	4,7	0,19	0,19	11	19	0,45	nd	nd	0,06	50	642	18344	0,17	63
<b>Lavoix 1.841</b>	99,1%	0,1%	140	1,9	35	14	nd	0,43	0,08	1,2	0,53	0,04	1,8	9,07	0,34	nd	nd	0,72	3438	518	4172	0,01	0,98
<b>Lavoix 2.44</b>	96,9%	1,8%	31	4,5	18	11	nd	2,4	0,47	1,4	0,19	0,10	26	8,6	0,45	nd	nd	0,16	211	398	6793	0,05	5727
<b>Lavoix 1.904</b>	77,6%	21,6%	nd	64	26	759	nd	0,33	7,7	8	0,44	2,1	191	117	3,5	nd	nd	0,28	1748	1858	3357	nd	312
<b>Lavoix 2.94</b>	95,8%	3,0%	18	1,5	2,4	4,0	nd	0,26	0,96	2,0	0,40	0,00	1,6	002	0,69	nd	nd	0,19	538	394	6587	0,03	4396
<b>Lavoix 1.983</b>	99,4%	0,1%	43	0,8	21	1,6	nd	2,1	0,10	1,3	0,54	0,02	1,3	0,48	4,9	nd	nd	0,5	133	144	3188	0,18	1636
<b>Lavoix 1.987</b>	95,6%	3,8%	nd	18	4,4	78	nd	0,29	0,94	1,1	0,14	0,04	4,3	42	1,2	nd	nd	0,04	9,3	409	1539	0,02	3217
<b>Lavoix 1.1060</b>	97,6%	1,4%	27	1,4	32	7,8	nd	0,26	0,42	1,8	0,44	0,04	5,2	3,4	1,5	nd	nd	0,41	2772	311	7235	0,06	232

## Les monnaies sélectionnées d'après la connaissance de la production minière dans le Califat Abbasside

	Ag	Cu	Fe	Ni	Zn	As	Se	Ru	Rh	Pd	Cd	In	Sn	Sb	Te	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Pb	Tl	Bi
<b>Lavoix 1.802</b>	98,9%	0,3%	151	1,5	42	3,7	nd	0,11	0,06	0,47	0,22	0,05	4,9	0,53	0,42	nd	nd	0,15	780	737	6082	0,01	512
<b>BnF 778bis</b>	95,3%	2,5%	34	0,69	12	7,4	nd	0,13	0,32	1,8	0,50	0,03	1,6	4,6	2,9	nd	nd	0,87	3935	553	17760	0,06	223
<b>Lavoix 1.777</b>	79,7%	18,2%	25	18	10	42	nd	0,08	1,7	2,3	0,18	0,11	14	765	0,16	nd	nd	0,04	11	4598	14757	0,08	65
<b>Lavoix 1.779</b>	98,8%	0,2%	72	nd	19	18	nd	0,11	0,04	1,3	0,78	0,03	2,9	3,2	0,27	nd	nd	0,95	3656	1748	3854	0,02	2,7
<b>Lavoix 1.781</b>	96,2%	2,7%	nd	3,2	0,80	6,8	nd	0,31	0,19	0,82	0,12	0,22	6,4	1,4	0,27	nd	nd	0,04	323	635	9075	0,06	1177
<b>Lavoix 1.782</b>	94,4%	4,4%	22	7,5	12	9,1	nd	0,34	0,27	0,94	0,21	0,57	71	002	0,68	nd	nd	0,12	478	644	9703	0,05	826
<b>Lavoix 1.783</b>	93,1%	5,3%	4,2	17	13	18	nd	0,25	0,34	1,09	0,14	0,52	6,3	005	0,77	nd	nd	0,03	350	381	13740	0,03	964
<b>Lavoix 1.787</b>	99,2%	0,2%	3,6	nd	0,54	0,10	nd	0,13	0,02	0,24	0,16	0,00	1,9	0,01	0,13	nd	nd	0,07	252	411	4181	0,07	885
<b>BnF 848bis</b>	97,8%	1,5%	nd	0,88	0,90	2,0	nd	0,12	0,12	0,51	0,16	0,04	1,7	0,58	10,13	nd	nd	0,11	330	1030	4669	0,05	844
<b>Lavoix 1.848</b>	98,3%	0,5%	nd	0,20	6,3	0,91	nd	0,14	0,08	0,53	0,13	0,01	4,0	0,07	0,95	nd	nd	0,01	120	357	11978	0,03	134
<b>BnF 1970.335</b>	99,4%	0,1%	10	0	0,38	nd	nd	0,26	0,01	0,18	0,10	0,00	0,33	0,01	0,23	nd	nd	0,00	212	391	2394	0,02	1969
<b>BnF 1974.570.30</b>	99,3%	0,2%	nd	0,11	0,19	0,19	nd	0,22	0,03	0,33	0,16	0,01	0,04	0,00	0,24	nd	nd	0,06	120	407	4158	0,08	823
<b>BnF 1974.521</b>	96,7%	2,5%	17	3,5	0,42	9,8	nd	0,17	0,23	0,49	0,20	0,00	0,59	44	0,87	nd	nd	0,02	555	1494	4866	0,04	702
<b>Lavoix 1.778</b>	98,9%	0,3%	1,6	nd	0,43	0,05	nd	0,15	0,04	0,29	0,08	0,00	nd	0,17	1,7	nd	nd	0,06	219	1013	4410	0,05	2250
<b>BnF 1965.171</b>	98,8%	0,2%	15	nd	0,90	0,23	nd	0,23	0,06	0,29	0,13	0,00	1,4	0,73	002	nd	nd	0,02	273	2942	4555	0,03	2763
<b>Lavoix 1.803</b>	98,9%	0,3%	2,6	nd	0,89	0,8	nd	0,09	0,06	0,26	0,09	0,01	0,41	0,06	1,4	nd	nd	0,03	247	940	4409	0,06	2332
<b>Lavoix 1.861</b>	98,5%	0,2%	92	2,94	25	27	nd	0,16	0,06	0,70	0,18	0,03	1,29	14	0,16	nd	nd	0,49	1895	498	11244	0,02	1,22
<b>Lavoix 1.858</b>	98,1%	1,1%	6,6	nd	1,2	3,7	nd	0,26	0,07	0,55	0,08	0,02	0,64	0,39	0,31	nd	nd	0,14	517	207	7324	0,02	77
<b>Lavoix 1.857</b>	99,2%	0,1%	85	nd	0,82	0,10	nd	0,10	0,04	0,40	0,04	3,3	1,21	0,17	0,69	nd	nd	0,01	202	337	4705	0,06	1876
<b>Lavoix 1.859</b>	99,7%	0,1%	98	2,3	72	0,6	nd	0,24	0,04	0,32	0,28	0,03	1,1	0,14	0,70	nd	nd	0,18	330	374	711	0,06	42







## **Guillaume SARAH**

### **Caractérisation de la composition et de la structure des alliages argent-cuivre par ICP-MS avec prélèvement par ablation laser. Application au monnayage carolingien.**

Les monnaies anciennes à base d'argent présentent fréquemment des variations de composition en fonction de la profondeur qui apparaissent principalement suite à leur enfouissement. Une analyse juste de ces échantillons impose de s'affranchir de cette couche superficielle perturbée pour caractériser l'alliage qui n'a pas été affecté par ces modifications. L'analyse par spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif avec prélèvement par ablation laser (LA-ICP-MS) permet une approche en profils de concentration qui peut rendre compte des variations de teneur selon la profondeur. Un protocole analytique par LA-ICP-MS a été développé spécifiquement pour les monnaies d'argent, qui permet de visualiser la couche de surface perturbée pour caractériser l'alliage sain lors de l'analyse des éléments majeurs. Les caractéristiques intrinsèques de la méthode LA-ICP-MS ont bénéficié au dosage des éléments mineurs et traces : le nombre d'éléments dosés et les limites de détection très basses permettent de caractériser l'ensemble des constituants de ces alliages. Des méthodes d'analyse complémentaires ont été mises en œuvre pour valider le protocole analytique proposé.

Les monnaies d'argent des premiers souverains carolingiens sont les premières à avoir bénéficié des avancées analytiques permises par l'application de la méthode LA-ICP-MS aux échantillons de ce type. L'évolution du titre d'argent de pièces frappées entre 751 et 864 a été étudiée, et corrélée aux données numismatiques et historiques. Des spécificités régionales ou locales du point de vue de la pureté des alliages monétaires ont été observées. L'examen des teneurs en éléments mineurs et traces caractéristiques, susceptibles de témoigner de mélanges ou de mouvements de stocks de métaux précieux, a mis en évidence des particularités de l'argent frappé par certains ateliers monétaires, en particulier celui de Venise.

Mots-clés : argent ; analyse ; ICP-MS ; profils de concentration ; monnaie ; provenance ; numismatique.

### **Characterisation of the composition and the structure of silver-copper alloys using ICP-MS with laser ablation. Application to Carolingian coinage.**

During the analysis of ancient silver coins, compositional results will vary depending on the depth of the analysis taken. The variable composition of the coins mainly occurs as a result of depositional conditions. Therefore a reliable analysis of these artefacts requires the removal of the silver-enriched surface layer to reveal the unaffected alloy. The alloy can be characterised by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS), which generates concentration profiles to estimate the evolution of the composition throughout the depth of the coin. By this way, the silver-enriched surface layer can be removed to analyse the unaffected alloy for the major elements present. Minor and trace elements also benefit from the main features of LA-ICP-MS: the large number of elements that can be measured and the low detection limits provide a complete characterisation of these alloys. Complementary analytical methods have been used to validate the LA-ICP-MS protocol developed.

The silver coins minted by Carolingian rulers are the first to have benefited from the improvements provided by the application of LA-ICP-MS to these objects. The evolution of the fineness of coins minted from 751 to 864 AD has been studied and scrutinized regarding the numismatic and historical data. Some geographical disparities regarding the silver content of the alloys have appeared. The study of the concentrations of minor and trace elements present within the coins has revealed differences in the fingerprint of the silver used for coin striking in specific mints, notably at Venice.

Keywords : silver ; analysis ; ICP-MS ; concentration profile ; coin ; provenance ; numismatics.



**INSTITUT DE RECHERCHE SUR LES ARCHÉOMATÉRIAUX**

**Centre Ernest Babelon**

**CNRS – Université d'Orléans**

**3D rue de la Férollerie**

**45071 Orléans Cedex 2 - FRANCE**

