



HAL
open science

Analyse par la microscopie électronique à balayage de monnaies féodales bretonnes

Jérémy Morvan, Philippe Elies

► **To cite this version:**

Jérémy Morvan, Philippe Elies. Analyse par la microscopie électronique à balayage de monnaies féodales bretonnes . 2018. hal-01831986

HAL Id: hal-01831986

<https://hal.science/hal-01831986>

Preprint submitted on 6 Jul 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse par la microscopie électronique à balayage de monnaies féodales bretonnes

Jérémy Morvan

Maître de conférences

Laboratoire LEGO

Université de Brest

Université Bretagne Loire

CS 93837, 3 rue des Archives, Brest 29238 Cedex 3, France

Philippe Elies

Ingénieur de recherche

Service général des plateformes

Université de Brest

Université Bretagne Loire

CS 93837, 3 rue des Archives, Brest 29238 Cedex 3, France

L'objet de cet article est d'étudier trois séries de monnaies bretonnes frappées à la charnière des XII^e et XIII^e siècles en utilisant une méthodologie peu courante en numismatique. La microscopie à balayage électronique (MEB) mesure la composition d'un objet métallique. L'étude met en évidence une forte variation dans les proportions de métal précieux à la fois entre les monnaies d'une même série et entre les séries de monnaies. De plus, il apparaît que les monnaies sont relativement différentes tant par leur aloi que leur poids.

Mots-clés : monnaies féodales, microscopie électronique à balayage

La numismatique bretonne est caractérisée par sa richesse, sa durée (sa production s'étale sur près de cinq siècles) et certains exemplaires restés célèbres (la cadrière est une des premières monnaies où figure la date d'émission). Mais la numismatique bretonne est également caractérisée par la rareté de ses archives. Le pouvoir ducal a longtemps été faible et une partie des archives a disparu (Kerhervé, 1987). D'autres sources d'information doivent alors être mobilisées, qu'elles soient documentaires (actes juridiques émis par d'autres autorités, mémoires...) ou matérielles (Coativy, 2006). Cette recherche repose sur une technique peu utilisée : la microscopie électronique à balayage (MEB) est une méthode non-destructive qui mesure la composition et les proportions de l'alliage monétaire. Centrée sur une période troublée qui marque le passage de l'influence des Plantagenêts à l'influence capétienne sur le duché breton, cette étude illustre les potentialités mais aussi les limites de cette méthode d'analyse. Ainsi dans une première partie, nous présentons le contexte et les échantillons de monnaies étudiées d'une part et le fonctionnement de la MEB d'autre part. Dans une seconde partie, nous présentons les résultats et en proposons une critique.

1. Monnaies et microscopie électronique à balayage

Nous présentons les trois échantillons de monnaies féodales étudiés et le principe de fonctionnement de la microscopie à balayage électronique (MEB).

a. Echantillon de monnaies féodales bretonnes

Trois séries de monnaies féodales bretonnes référencées JEZ34, JEZ37 et P... sont étudiées. Elles sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 – Présentation des monnaies étudiées

Numéro	Référence	Poids (g)	Atelier
1	JEZ34.1	1,065	Nantes
2	JEZ34.2	1,256	Nantes
3	JEZ34.3	0,980	Nantes
4	JEZ34.4	0,996	Nantes
5	JEZ34.5	0,849	Nantes
6	JEZ34.6	0,979	Nantes
7	JEZ37.1	0,932	Rennes
8	JEZ37.2	0,879	Rennes
9	JEZ37.3	0,907	Rennes
10	JEZ37.4	0,874	Rennes
11	JEZ37.5	0,721	Rennes
12	JEZ37.6	0,979	Rennes
13	JEZ37.7	0,567	Rennes
14	JEZ37.8	0,904	Rennes
15	P1	0,706	Guingamp
16	P2	0,672	Guingamp
17	P3	0,645	Guingamp

Toutes ces monnaies sont en billon, un alliage principalement de cuivre et d'argent dans des proportions variables. Ce sont des monnaies de circulation qui ne constituent pas une grande réserve de valeur.

Pour les JEZ34 et JEZ37, les périodes d'émission sont l'objet d'un débat. Pour Bigot (1857), elles sont rattachées indistinctement aux règnes de Constance (1186-1196), Arthur I^{er} (1196-1203) et Guy de Thouars (1203-1206). Pour Jézéquel (1998), les monnaies sont également rattachées à Constance (1186-1202), Arthur (1202) et Guy de Thouars (1202-1206 et 1207-1213). Les dates diffèrent donc légèrement pour s'étaler sur une période qui se termine en 1206 ou 1213. Coativy (2006) propose un scénario différent : il avance qu'il n'y a pas eu de monnayage entre Geoffroy II, époux de Constance et fils d'Henri II Plantagenêt, mort en 1186, et Pierre Mauclerc, duc à partir de 1213. En effet, les monnaies traditionnellement rattachées à Constance, Arthur et Guy de Thouars seraient en fait émises plus tardivement puisqu'elles n'apparaissent que dans les trésors datant au moins de Pierre Mauclerc. Les séries de Nantes et Rennes seraient donc à dater de la première moitié du XIII^e siècle. Les monnaies de Guingamp constituent un échantillon-témoin qui permet de mettre en perspective les différences éventuelles entre les échantillons JEZ34 et JEZ37. C'est un monnayage immobilisé au nom d'Etienne. En l'état des connaissances, il est probable que l'échantillon de Guingamp soit légèrement antérieur aux monnaies frappées à Rennes et Nantes, avant 1184 (Jézéquel, 1998).

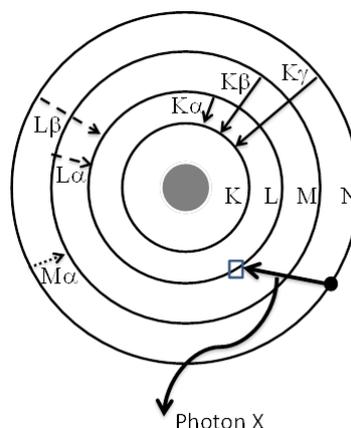
L'objectif de cette étude est donc de tenter d'apporter un éclairage complémentaire sur des séries de monnaies dont le contexte est peu ou mal connu.

b. Principe de la microscopie électronique à balayage

Le principe de la MEB est basé sur l'étude de l'interaction entre un faisceau d'électrons et la surface à étudier. Une des interactions électrons-matière provoque l'émission d'un rayonnement électromagnétique dans le domaine des rayons X sous forme de photon X. La mesure de l'énergie des photons X émis permet de remonter aux éléments chimiques présents à la surface de l'échantillon observé.

Plus un élément chimique a un numéro atomique élevé, plus il a d'électrons qui s'organisent en couche autour du noyau. Lorsqu'un électron incident chasse un électron d'une couche interne, un électron d'une couche supérieure va venir combler le vide laissé. Or les électrons des couches extérieures sont plus énergétiques, donc cette relaxation va s'accompagner d'une émission d'énergie sous forme d'un photon X. Cette énergie est propre à chaque couche et à chaque élément chimique, il est donc possible d'identifier les éléments présents à la surface des échantillons, en mesurant finement l'énergie des photons X émis. Bien évidemment, il peut y avoir plusieurs relaxations possibles pour un élément s'il a plus de deux couches atomiques, suivant la notation illustrée sur le graphique qui suit.

Graphique 1 - Différentes émissions de photons X possibles



2. Résultats et discussion

Cette partie présente les principaux résultats et une interprétation des données obtenues.

a. Résultats

La MEB permet de déterminer les proportions d'argent (Ag), de cuivre (Cu) et d'éléments traces : plomb (Pb), silice (Si), magnésium (Mg), aluminium (Al). Chaque monnaie est l'objet d'une à quatre mesures.

Tableau 2 - Proportion de métaux dans l'alliage monétaire

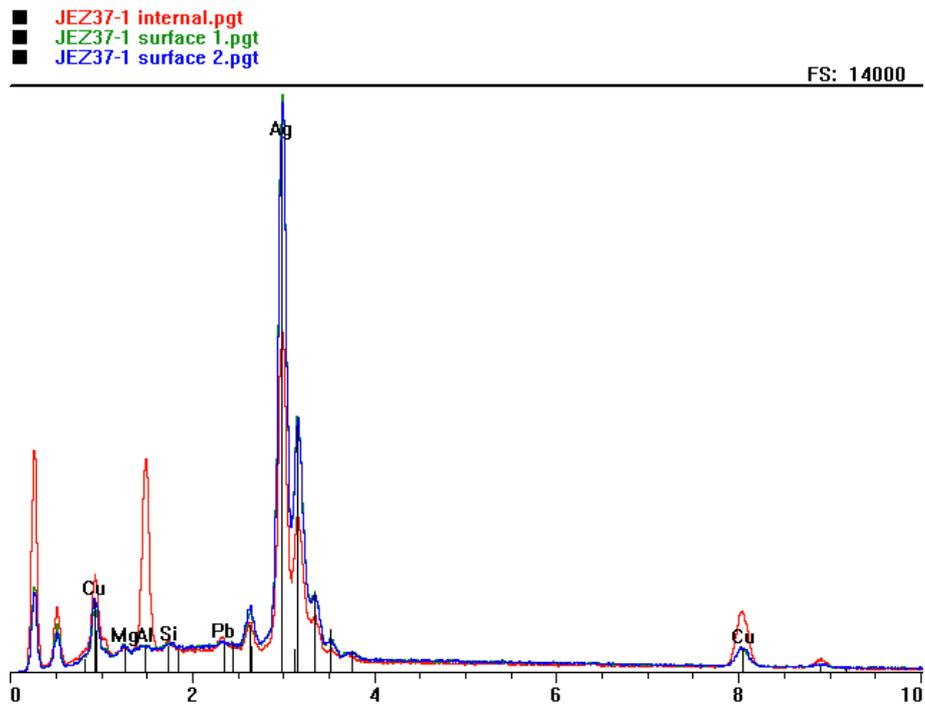
Réf. MEB	Réf. monnaie	Poids (g)	Ag (%)	Cu (%)	Pb (%)	Si (%)	Mg (%)	Al (%)	Ville
----------	--------------	-----------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	-------

1	JEZ34.1	1,065	41,04	56,19	2,11	0,38	0,28	0,00	Nantes
22	JEZ34.1	1,065	43,97	53,22	2,05	0,38	0,38	0,00	Nantes
23	JEZ34.1	1,065	42,54	54,32	2,26	0,40	0,21	0,26	Nantes
2	JEZ34.2	1,256	87,69	10,43	1,25	0,00	0,63	0,00	Nantes
24	JEZ34.2	1,256	91,00	6,47	0,91	0,39	0,81	0,41	Nantes
25	JEZ34.2	1,256	83,33	13,95	1,29	0,40	0,67	0,36	Nantes
3	JEZ34.3	0,980	63,43	34,12	1,46	0,46	0,53	0,00	Nantes
21	JEZ34.3	0,980	63,77	33,77	1,92	0,54	0,00	0,00	Nantes
26	JEZ34.3	0,980	55,26	41,53	1,75	0,51	0,54	0,40	Nantes
4	JEZ34.4	0,996	56,51	38,08	3,96	0,58	0,43	0,44	Nantes
27	JEZ34.4	0,996	59,04	35,12	4,15	0,76	0,54	0,39	Nantes
28	JEZ34.4	0,996	56,90	38,38	3,42	0,51	0,46	0,32	Nantes
5	JEZ34.5	0,849	94,07	4,18	0,92	0,00	0,82	0,00	Nantes
19	JEZ34.5	0,849	95,04	2,20	1,15	0,31	0,84	0,45	Nantes
28	JEZ34.6	0,979	61,25	35,65	1,77	0,37	0,54	0,41	Nantes
29	JEZ34.6	0,979	52,55	44,45	1,84	0,53	0,30	0,32	Nantes
30	JEZ34.6	0,979	61,05	36,02	1,50	0,56	0,50	0,37	Nantes
6	JEZ37.1	0,932	92,12	5,55	0,68	0,37	0,82	0,46	Rennes
14	JEZ37.1	0,932	62,66	21,09	1,79	0,67	0,63	13,15	Rennes
15	JEZ37.1	0,932	82,24	12,19	2,60	0,37	0,78	1,83	Rennes
16	JEZ37.1	0,932	91,61	6,10	0,71	0,33	0,75	0,50	Rennes
7	JEZ37.2	0,879	81,33	14,82	2,32	0,00	0,55	0,00	Rennes
8	JEZ37.3	0,907	52,27	43,8	1,73	0,61	0,51	1,09	Rennes
9	JEZ37.4	0,874	53,90	41,09	2,73	1,21	0,42	0,63	Rennes
10	JEZ37.5	0,721	57,05	38,51	2,70	0,73	0,50	0,52	Rennes
11	JEZ37.6	0,979	77,62	16,95	3,19	0,74	0,67	0,84	Rennes
12	JEZ37.7	0,567	92,54	4,41	1,08	0,5	0,86	0,62	Rennes
18	JEZ37.7	0,932	89,78	7,52	0,9	0,43	0,58	0,79	Rennes
13	JEZ37.8	0,904	87,00	8,78	2,81	0,29	0,68	0,44	Rennes
17	JEZ37.8	0,904	86,54	11,08	1,04	0,33	0,55	0,46	Rennes
20	JEZ37.8	0,904	91,87	6,11	0,51	0,29	0,69	0,53	Rennes
34	P1	0,706	87,50	7,19	3,69	0,47	0,68	0,46	Guingamp
35	P1	0,706	84,34	9,41	4,60	0,50	0,69	0,46	Guingamp
36	P1	0,706	89,25	6,73	2,57	0,37	0,65	0,42	Guingamp
37	P2	0,672	89,71	6,52	2,08	0,41	0,81	0,47	Guingamp
38	P2	0,672	90,46	6,29	1,76	0,37	0,69	0,43	Guingamp
39	P2	0,672	89,85	6,48	1,99	0,43	0,78	0,45	Guingamp
40	P3	0,645	86,75	7,40	2,82	0,87	0,78	0,77	Guingamp
41	P3	0,645	86,14	7,53	2,50	0,74	0,56	0,56	Guingamp
42	P3	0,645	82,07	11,55	2,61	0,93	0,65	0,75	Guingamp

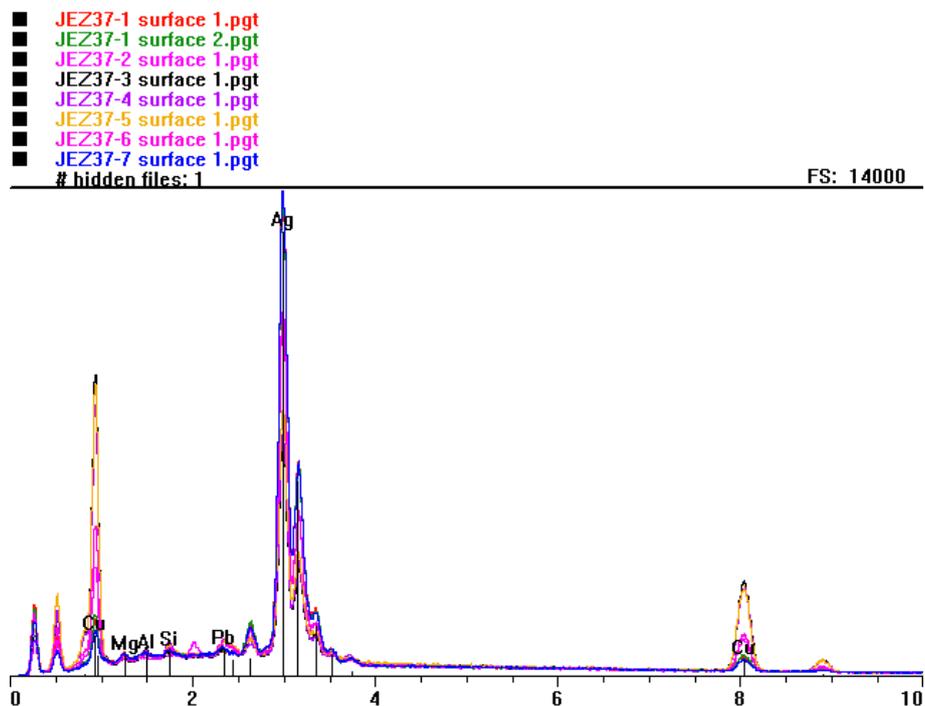
L'échantillon de Guingamp pose une originalité avec la présence de soufre et/ou de fer dans P3. Dans la mesure où ces éléments sont caractéristiques des monnaies frappées à Guingamp, ils ne sont pas reportés dans le tableau ci-dessus. La variabilité des proportions de métaux est évidente, y compris

pour les métaux précieux. L'argent varie ainsi de 41% à 95% pour les JEZ34 et de 53% à 92% pour les JEZ37. Pour Guingamp, la variabilité est bien moindre surtout en ce qui concerne la proportion d'argent. Les deux graphiques qui suivent illustrent la variabilité des spectres pour deux des types de monnaies étudiés.

Graphique 2 - Quelques spectres des monnaies JEZ34



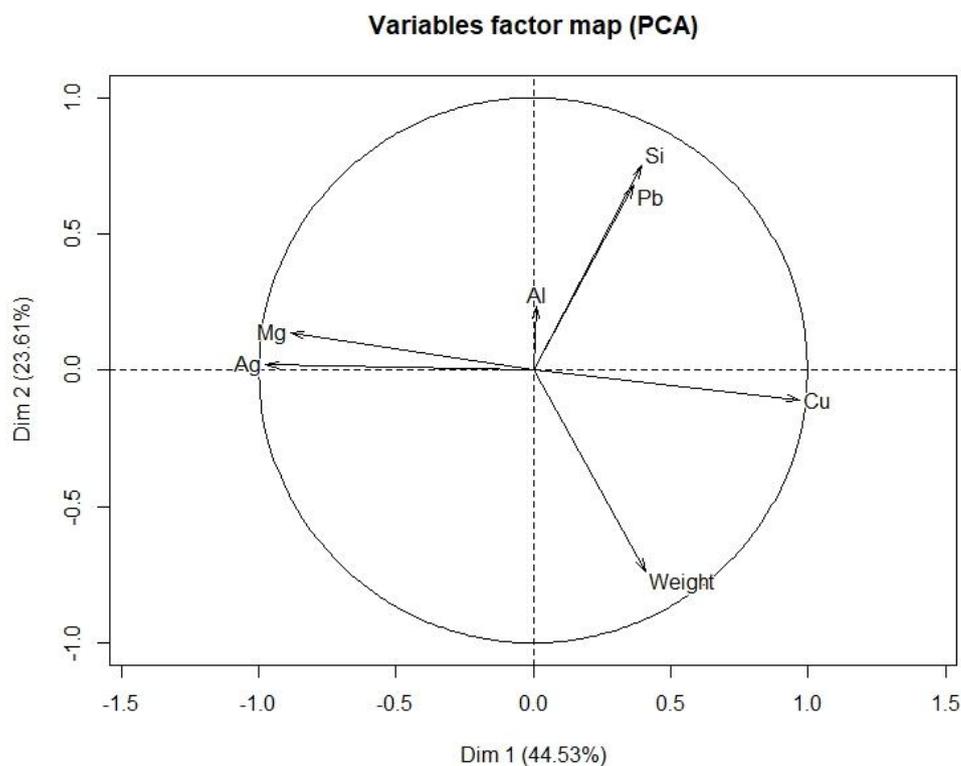
Graphique 3 – Quelques spectres de monnaies JEZ 37



En abscisse, figure l'énergie des photons X, mesurée en kilo électron volt (kev) et destinée à détecter les composants de l'alliage. Les composants apparaissent et sont identifiés manuellement par l'opérateur. Les deux premiers pics entre 0 et 0,5 concernent le carbone et l'oxygène. Considérés comme des polluants, ils sont éliminés de l'analyse. Le cuivre autour de 8 est un écho du cuivre détecté autour de 3. En ordonnée, figure le nombre de photons reçus. Plus la courbe est élevée, plus la présence d'un métal est importante. La MEB met en évidence que l'alliage est principalement composé d'argent et de cuivre dans des proportions variées.

Les données acquises par la MEB permettent de procéder à une analyse en composantes principales (ACP) sous le logiciel R avec le *package* « FactoMineR » (Lê *et al.*, 2008). Le premier résultat est l'analyse des variables.

Graphique 4 - Analyse des variables

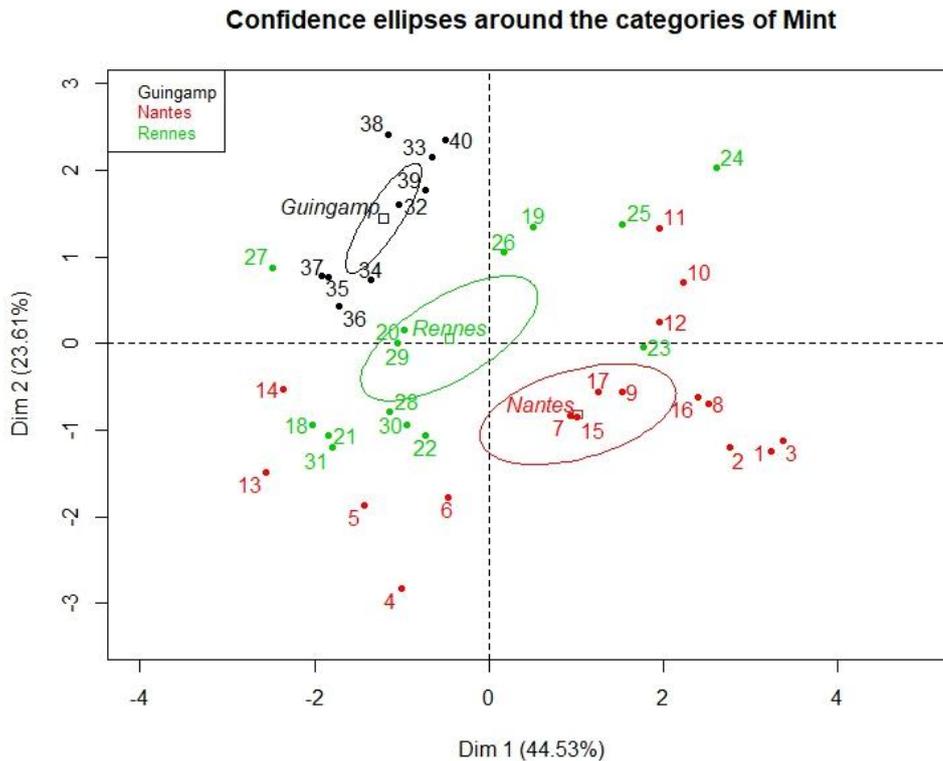


En abscisse, l'analyse indique que les proportions d'argent et de magnésium sont liées et s'opposent à la proportion de cuivre : plus il y a de l'un (des uns), moins il y a de l'autre. Ainsi émerge un premier axe d'analyse qui explique près de 45% de la variance : le métal précieux s'oppose au métal vil destiné à compléter la soupe monétaire. C'est donc un axe fondé sur la qualité chimique (aloi). Le second axe, en ordonnée, explique un peu moins de 25% de la variance. Il oppose le poids des monnaies et un mix composé surtout de la silice et du plomb. L'aluminium, le plomb et la silice sont présents dans des proportions indépendantes par rapport aux proportions d'argent et de cuivre. Cet axe est plutôt fondé sur la qualité physique des monnaies. Le poids peut être une variable maîtrisée par l'autorité émettrice et en même temps le résultat de l'usure des monnaies. De plus, l'aluminium, le plomb et la silice peuvent être diversement et simultanément des résidus des processus de métallurgie et des pollutions.

Les deux axes ne sont pas parfaitement orthogonaux. Cette caractéristique peut avoir pour source la double origine de la qualité physique des monnaies : le poids d'une monnaie peut dépendre de son usure et/ou d'une décision de l'autorité émettrice.

L'ACP permet d'expliquer près de 68% de la variance des données. Le graphique suivant projette sur les deux axes définis les résultats de la MEB. La ville d'émission définit le barycentre de chaque nuage. Chaque nuage est défini par une ellipse de confiance à 95%.

Graphique 5 – Analyse des données



La projection des points sur les deux axes permet de visualiser plusieurs éléments. D'une part, la dispersion des points illustre l'importante variabilité de la composition chimique au sein de chaque série de monnaies, surtout dans le cas des échantillons de Rennes et Nantes par rapport aux monnaies de Guingamp dont les mesures sont plus regroupées. D'autre part, les trois nuages se recoupent peu. Ce résultat tend à confirmer les distinctions traditionnelles entre les séries. Ainsi, l'analyse jusqu'ici visuelle de la surface des monnaies est confirmée par la MEB : les monnaies sont distinctes, non seulement par leurs avers et revers, mais également par la composition de leur alliage. Par ailleurs, l'analyse statistique met en évidence les différences de poids dans les monnaies. Il semble probable que les monnaies frappées à Guingamp sont les plus légères tandis que les émissions nantaises sont les plus lourdes. Par contre, les émissions de Guingamp ont la proportion de métal précieux la plus importante. De manière globale, les trois monnaies marquent des différences qui reflètent des émissions différentes en poids et également en aloi. A ce titre, il est tentant de considérer une relation inverse entre poids et aloi, qui confirmerait une gestion fine des émissions monétaires : la quantité (et non la proportion) de métal précieux pourrait être assez stable, quand le poids de la monnaie peut varier.

b. Discussion

Cette étude permet de présenter plusieurs apports de la MEB à la numismatique mais oblige à considérer également quelques limites ou précautions.

Quelques apports

L'apport principal de l'étude est double. D'une part, en procédant à plusieurs mesures pour chaque monnaie, la méthode non-destructive permet d'obtenir une estimation de l'aloï. Un résultat est donc de mettre en évidence la variabilité de l'aloï au sein d'une même série. D'autre part, en procédant à plusieurs mesures sur différentes séries de monnaie, la MEB permet de distinguer la composition des séries étudiées. Un second résultat est donc de mettre en évidence la variabilité de l'aloï entre deux séries. Il apparaît ainsi que si les séries sont regroupées sans distinction dans une catégorie où l'autorité émettrice n'est pas connue avec exactitude, elles ont pour autant une histoire. Les monnaies se différencient alors par leur poids et par leur aloï.

Plus méthodologiquement, la MEB est également un test de pertinence des référentiels existants (Jézéquel ou Bigot pour les monnaies bretonnes) reposant sur la description des monnaies. Une étude de grandes séries de monnaies serait sans doute définitive mais il paraît déjà que les trois échantillons se distinguent.

Une analyse plus systématique, notamment longitudinale, permettrait d'enrichir la connaissance de la production monétaire bretonne en caractérisant la conjoncture monétaire, économique et - parce que l'émission monétaire est un acte de souveraineté - politique de l'autorité émettrice. La difficulté est que la quantité de métal noble dans une monnaie peut être l'expression de deux contextes économiques et monétaires différents. En période de crise, l'autorité émettrice peut être tentée de corrompre la monnaie en modifiant l'aloï de la monnaie qu'elle émet : pour une quantité donnée d'argent, le nombre de monnaies augmente et/ou la taille de la monnaie diminue (Jézéquel distingue ainsi la JEZ 34 « grand denier » et la JEZ 35 « petit denier » et cette étude met en évidence la possibilité d'une relation inverse entre poids et aloï). De même, en période de croissance économique, pour alimenter le développement des échanges, l'autorité émettrice peut également être tentée d'émettre une grande quantité de monnaies sans disposer de la quantité suffisante de métal précieux. Les nouvelles monnaies sont alors composées d'une proportion plus faible de métal précieux que les précédentes. Les proportions de métal précieux détectées par la MEB ne peuvent donc à elles seules caractériser le contexte économique. La recherche sur le contexte historique demeure donc nécessaire.

Limites du MEB

Cette contribution ne peut s'achever sans évoquer deux difficultés – au moins – de la MEB. Les pollutions et l'hétérogénéité de la soupe monétaire appellent ainsi une précaution générale.

Pour chaque mesure, la MEB a étudié une surface de 2,5 mm sur 2,5 mm. La pollution aléatoirement disposée a donc un impact sur les résultats. Deux solutions sont possibles :

- La première est méthodologique : un nettoyage à l'acétone et aux ultra-sons pour une étude de la surface, ou une découpe de la monnaie à l'azote liquide pour une étude de coupe, au cœur de la monnaie, cette dernière solution étant évidemment destructive ;

- La seconde est statistique : comme nous avons ici procédé, plusieurs mesures réparties aléatoirement sur la surface de *chaque* monnaie minimisent l'erreur de mesure due à la pollution. Pour les soutes monétaires hétérogènes, la loi des grands nombres est également une solution. Des mesures sur *plusieurs* monnaies d'une même série permettent également de minimiser l'erreur de mesure.

De manière globale, pollutions et hétérogénéité des monnaies impliquent que l'analyse par la MEB doit être répétée. Ainsi, pour chaque monnaie, il est nécessaire de procéder à plusieurs mesures. Pour chaque série, il est nécessaire d'étudier plusieurs monnaies. L'étude est donc d'autant plus robuste qu'elle repose sur un échantillon conséquent, idéalement au moins une trentaine de monnaies par série.

Conclusion

Cette étude présente les potentialités de la MEB pour la numismatique. La MEB permet d'identifier les composants d'un alliage monétaire et d'en mesurer les proportions. L'équipement repose sur une technologie simple, peu coûteuse et donc relativement plus accessible que d'autres (Coativy, 2006). Avec un échantillon de 17 monnaies frappées sur une période restreinte entre la fin du XIIe et la fin de la première moitié du XIIIe, nous mettons en évidence la variabilité possible de l'aloï au sein d'une même série : entre les monnaies de la série JEZ34, la proportion d'argent peut varier de 40% à 95%. Nous mettons également en évidence la variabilité entre séries. Le choc monétaire est d'importance puisqu'il équivaut à une dévaluation de 50% ou une réévaluation de 100%, selon le sens des opérations. La portée des résultats est toutefois limitée dans la mesure où, s'inscrivant dans une démarche quantitative, la méthode nécessite l'étude de grandes séries. L'apport jouerait à plein dans le cadre d'une étude plus systématique, longitudinale permettant d'évaluer plus finement la variance intra-série et la variance inter-série.

Bibliographie

Bigot Alexis (1857), *Essai sur les monnaies du royaume et duché de Bretagne*, Les Presses d'Orthez, 412 pages

Coativy Yves (2006), *La monnaie des ducs de Bretagne : de l'an mil à 1499*, PUR, 453 pages

Jézéquel Yannick (1998), *Les monnaies des comtes et ducs de Bretagne : X^e au XV^e siècle*, Maison Florange, 304 pages

Kerhervé Jean (1987), *L'État breton au XIV^e et XV^e siècle : Les ducs, l'argent et les hommes*, Maloine, 1080 pages

Lê Sébastien, Josse Julie, Husson Francois (2008), « FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis ». *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1-18. 10.18637/jss.v025.i01