



HAL
open science

Les glaçures noires et brunes de la dynastie Song : des matériaux à haut potentiel en sciences et en histoire du patrimoine

Clément Holé

► **To cite this version:**

Clément Holé. Les glaçures noires et brunes de la dynastie Song : des matériaux à haut potentiel en sciences et en histoire du patrimoine. Physique [physics]. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2022. Français. NNT : . tel-04024035

HAL Id: tel-04024035

<https://hal.science/tel-04024035>

Submitted on 10 Mar 2023

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.



THÈSE

**En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE
Délivré par l'Université Toulouse 3 - Paul Sabatier**

**Présentée et soutenue par
Clément HOLÉ**

Le 9 novembre 2022

**Les glaçures noires et brunes de la dynastie Song : des matériaux
à haut potentiel en sciences et en histoire du patrimoine**

Ecole doctorale : **SDM - SCIENCES DE LA MATIERE - Toulouse**

Spécialité : **Physique de la Matière**

Unité de recherche :

CEMES - Centre d'Elaboration de Matériaux et d'Etudes Structurales

Thèse dirigée par

Philippe SCIAU et Sophie DUHEM

Jury

Mme Ina REICHE, Rapporteur
M. Gilles WALLEZ, Rapporteur
M. Philippe DILLMANN, Examineur
M. Victor ETGENS, Examineur
M. Philippe SCIAU, Directeur de thèse
Mme Sophie DUHEM, Co-directrice de thèse
Mme Martine JOLY, Présidente

Remerciements

Je souhaite commencer cette partie en remerciant très sincèrement les membres du jury qui ont évalué le travail présenté dans le manuscrit qui suit et lors de la soutenance publique ayant eu lieu le mercredi 9 novembre 2022, dans la salle des conférences du CEMES. Je remercie d'abord Ina Reiche et Gilles Wallez, rapporteurs de ce travail, pour leurs lectures attentives et leurs rapports riches en suggestions d'amélioration et conseils précieux, ainsi que Philippe Dillmann, Victor Etgens et Martine Joly, examinateurs, pour les réflexions enrichissantes et les échanges exprimés lors de la soutenance.

Je voudrais ensuite exprimer ma gratitude la plus profonde et mes remerciements les plus chaleureux envers les deux directeurs de thèse qui m'ont accompagné au cours de ces trois années pleines d'expériences que j'ai eu un très grand plaisir à vivre : Philippe Sciau et Sophie Duhem. Je remercie Philippe pour ses conseils avisés qui m'ont grandement aidé à explorer des directions qui paraissaient à la fois les plus pertinentes et les plus intéressantes ainsi que la convivialité des conversations au cours desquelles il me les a prodigués. Même si le trouver dans les couloirs du CEMES constituait parfois un challenge, il a toujours été très disponible pour répondre à mes interrogations. Il m'a en outre fait découvrir de manière plus avertie (et surtout prendre goût) aux plaisirs du thé à travers sa passion très contagieuse pour cette décoction, parfaitement en accord avec les céramiques étudiées pendant ces trois ans. Je remercie Sophie pour son volontarisme et sa disponibilité remarquables. Elle a trouvé, il y a trois ans, un étudiant sans vraiment de bases en histoire de l'art à former aux exigences de sa discipline, ce qu'elle a fait avec beaucoup de patience et de pédagogie. Je tiens également à souligner son immense travail de traduction et documentation des articles en chinois qui m'a permis d'entrevoir cette littérature d'une importance considérable dans l'étude d'objets fabriqués en Chine. Enfin, l'accord entre des sciences des matériaux et l'histoire de l'art n'est pas toujours très intuitif ou trivial à mettre en œuvre, et je suis très reconnaissant envers tous les deux pour leur bienveillance et les débats passionnés, ainsi que leur collaboration fructueuse qui m'ont permis d'adopter une approche profondément pluridisciplinaire, véritablement primordiale pour ce genre d'étude.

Je tiens également à remercier très affectueusement Tian Wang de l'Institute of Silicate Cultural Heritage (School of Material Science and Engineering, Shaanxi Key Laboratory of Green Preparation and Functionalization for Inorganic Materials, Shaanxi University of Science and Technology, 710021 Xi'an, Chine). Sans son implication et sa grande réactivité, il aurait été impossible de mener ce projet aussi sereinement avec les difficultés engendrées par le contexte sanitaire international ayant compliqué les échanges notamment avec la Chine, en particulier au cours des années 2020 et 2021. Je suis très reconnaissant envers elle de m'avoir impliqué dans plusieurs projets et espère avoir la chance de la rencontrer de visu au lieu de l'habituel (mais néanmoins bien pratique) intermédiaire d'un écran. Merci également aux doctorants de son équipe avec lesquels j'ai eu l'occasion d'échanger, particulièrement à Zhao Ren qui a fait beaucoup d'analyses de son côté, notamment sur des échantillons archéologiques qui ont permis de compléter celles que j'ai effectuées. Merci enfin aux institutions partenaires de son équipe, le musée des fours

de Yàozhōu (Tóngchuān, Shǎnxī, 727001 Chine), l'institut provincial d'archéologie et l'académie d'archéologie du Shǎnxī (Xī'ān, Shǎnxī, 710043 Chine) et l'institut de recherche des céramiques des fours de Jiàn (Nánpíng, Fújiàn, 353000 Chine), qui ont fourni la majorité des échantillons archéologiques sans lesquels cette étude aurait été impossible à réaliser.

Je remercie également chaleureusement toutes les autres personnes qui m'ont fourni de quoi compléter ce corpus d'échantillons. Shuanmin Ren des ateliers Lijia Porcelain Co. LTD des fours de Yàozhōu à Tóngchuān qui a fabriqué la série d'éprouvettes en température et en conditions artisanales dans les fours de sa société. Bing Zhao, qui m'a aimablement reçu pour discuter des échantillons anciens et fourni les tessons ramassés par Jiali Sha sur le site archéologique des fours de Tiānmù. Jianxing Sun qui a fabriqué et fourni les échantillons de recreation à glaçures à reflets bleus qui ont été comparés avec ceux fabriqués par Jean Girel, fournis par Patrice Lehuédé et accompagnés de plusieurs analyses avec l'autorisation de les utiliser et les présenter dans ce travail.

Enfin, je souhaite remercier Jean-Michel Garric du Musée des Arts de la Table (Abbaye de Belleperche, 82700 Cordes-Tolosannes, France) et Marie-Pierre Chaumet et Aude Batthelemy du Musée Georges Labit (31400 Toulouse, France) pour m'avoir reçu dans leur établissement pour étudier les bols de leurs collections et autorisé à apporter ceux sélectionnés au CEMES pour y être analysés.

Je souhaite ensuite saluer tous les collègues du CEMES avec lesquels j'ai eu l'occasion d'interagir au cours de ces trois dernières années. Ma première pensée va bien-entendu aux membres de l'équipe travaillant sur la thématique des matériaux du patrimoine : Magali Brunet, Christophe Faulmann et Chantal Brouca, qui m'ont accueilli dans l'équipe avec bienveillance et se sont toujours montrés à l'écoute en cas de besoin. La suivante aux doctorants et stagiaires de cette équipe avec qui j'ai le plus souvent partagé le bureau, toujours avec beaucoup de plaisir : d'abord Tawfa Ouissi et Bailin Shen qui étaient déjà là quand je suis arrivé et m'ont accueilli avec beaucoup de convivialité, puis Boxin Qiu, Dong Wang, Clément Marasse, Camille Montané et Cecilia Velino qui sont passés un moment dans l'équipe et avec qui j'ai connu beaucoup de bons moments, et enfin Agathe Duclos, Li Feng et Minli Wang qui prennent la suite, à qui je confie le bureau A122 et souhaite beaucoup de succès.

Ce projet n'aurait pas pu être mené dans de bonnes conditions sans l'aide de tous les collègues spécialistes des différentes techniques d'analyses et/ou logiciels de traitement que j'ai eu la chance de pouvoir utiliser, parfois accompagné, souvent en autonomie. Je les remercie ainsi tous très vivement pour cette aide précieuse. Robin Cours, pour m'avoir formé à la préparation de lame mince et l'utilisation du FIB ainsi qu'à l'utilisation de différents outils de préparation d'échantillons pour la microscopie électronique à balayage et ses conseils réguliers, notamment sur les portes échantillons à utiliser pour le TKD. Sébastien Joulié et Cécile Marcelot, d'une part tous les deux pour la formation à la microscopie électronique à transmission conventionnelle, d'autre part séparément, Sébastien pour l'acquisition et le traitement des données ACOM et Cécile pour l'acquisition des données EDS et la formation au logiciel Esprit v1.9 pour les traiter, avec qui travailler a été un vrai plaisir. Sébastien Moyano, pour la formation à la spectroscopie Raman, ses nombreux conseils pour améliorer mes acquisitions et son adaptabilité qui a notamment permis d'imaginer un dispositif expérimental adapté à l'étude de bols à thé de collections muséales. Nicolas Ratel-Ramon, pour la formation à la DRX et au logiciel Topas, ainsi que sa disponibilité

pour régler les occasionnels soucis de machine. David Neumeyer, pour sa formation à l'utilisation des fours du CEMES et sa petite blague ou simplement bonne humeur qu'il transmettait tous les jours quand je passais devant son bureau. Magali Brunet, en plus de la gentillesse de son accueil dans l'équipe patrimoine, pour son désir de tester le TKD sur les céramiques et la formation à cette technique qui ont permis d'obtenir des résultats très intéressants. J'ai également reçu de l'aide, des conseils ou une petite formation de nombreux autres collègues que j'aimerais citer : Marc Legros et Liz Karanja pour leurs conseils pratiques sur le TKD ; Frédéric Mompiau et Romain Gautier pour le traitement de ces données avec la suite de logiciels Pycotem ; Laure Noé pour la formation à l'enrobage d'échantillons ; Christophe Dehayes pour la formation au logiciel Casino et la journée au laboratoire TRACES ; Catherine Crestou pour la formation à l'utilisation de la scie à fil, Nicolas Cherry pour l'introduction à Zotero et les conseils (et surtout les nuits qui semblent l'avoir marqué) au FIB ; Sébastien Weber pour la formation des gestes de sécurité de base avec un laser.

Même si ce projet a été mené principalement au CEMES, j'ai eu la joie de travailler avec de nombreuses personnes et équipes d'autres institutions. J'aimerais remercier particulièrement Clément Crestin, étudiant en première année de Master d'Histoire de l'Art Moderne et Contemporaine à l'université Jean Jaurès (31058 Toulouse, France) pour son aide précieuse lors du dépouillement des différents catalogues, ouvrages et collections en lignes, en particulier pour les riches collections en ligne du Victoria and Albert Museum. Toujours réactif et plein de bonne volonté, travailler avec lui a été un véritable plaisir. Je voudrais ensuite remercier les équipes et personnes qui m'ont accueilli pour utiliser leurs équipements analytiques. D'abord l'équipe AGLAÉ (Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France, 75001 Paris, France), qui m'a reçu à deux reprises avec la convivialité et la disponibilité que je lui connaissais depuis mon stage de fin d'études en 2019. Je tiens à remercier notamment Quentin Lemasson et Laurent Pichon pour leur aide indispensable dans l'acquisition et le pré-traitement des données, ainsi que Raphaël Moreau (the Cyprus Institute, 2121 Aglantzia Nicosie, Chypre), ancien collègue stagiaire lors de mes quelques mois dans l'équipe AGLAÉ, qui a conçu un programme afin de redresser mes cartographies PIXE pour faire une intégration pertinente des profils de composition. Ensuite l'équipe de la ligne ID22 de l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility, 38000 Grenoble, France) et spécialement Catherine Dejoie, qui m'a accueilli, fait découvrir les joies (et les contraintes) liées à la diffraction de rayonnement synchrotron et surtout m'a encadré très gentiment à l'occasion de ma mission dans ce centre. Puis Arnaud Proietti (Centre de Microcaractérisation Raimond Castaing, 31400 Toulouse, France) pour ses conseils précieux qui, associés à ceux des collègues du CEMES, m'ont permis de trouver les conditions idéales pour obtenir des cartographies TKD de très bonne qualité. Enfin l'équipe PCMTH (Institut de Recherche de Chimie de Paris, 75005 Paris, France), qui m'a permis d'utiliser ses fours à atmosphère contrôlée (et m'excuse pour les creusets de platine qui n'ont pas résisté à l'attaque des glaçures cuites dedans...).

Pendant ces trois années, j'ai également eu l'occasion de faire des heures d'enseignement et je souhaite mentionner les personnes qui m'ont accompagné pour cette expérience enrichissante. De l'université Paul Sabatier (31062 Toulouse, France), Florence Benoit-Marquié et Pascal Dufour dont j'ai participé à l'encadrement respectivement des TP et des projets bibliographiques. Je voudrais également mentionner Nathalie Lafforge qui préparait les salles de TP et était toujours très disponible dès que j'avais une question, ainsi que Claire Kammerer qui m'a guidé vers ces

personnes à contacter. De l'ENSIACET (31030 Toulouse, Toulouse), Philippe Behra et Christèle Combes dont j'ai encadré les TD.

Ces années au CEMES m'ont permis, non seulement de travailler avec les nombreux collègues adorables cités plus haut, mais aussi de rencontrer et fréquenter beaucoup d'autres personnes avec lesquelles j'ai partagé de nombreux moments très agréables. D'abord Rémi Arras, avec qui j'ai passé tant d'occasions sympathiques (concerts, repas, cinéma...) que je ne pourrais pas les compter, notamment grâce à sa légendaire bonne humeur, surtout quand vient l'heure de la cantine (n'est-ce pas ?). Ensuite les doctorants avec qui j'ai partagé beaucoup de bons moments au et hors du laboratoire, en particulier Cécilia Boyon, Benjamin Galy, Paul Marcon, Sarah Mention, Martin Montagnac et Aurélien Roux avec qui j'ai souvent partagé des repas et soirées ; Kathrin Schneider, avec laquelle Tawfa, Rémi, son comagnon Eugen Runze et moi avons fait plusieurs restaurants et quelques escapades en fin de semaine ; Julien Dupuy et Laureen Moreaud avec qui j'ai passé beaucoup de temps lors de ma première année ; ainsi que Kilian Gruel, Camille Thenot, Intan Kusumaningrum, Simon Garrigou, Loïc Grossetete, Anaïs Fondet, Elio Karim, Estefania Alves, Tom Fournier, Kedar Sharma et Eloïse Rahier (en espérant n'avoir oublié personne). J'ai également côtoyé plusieurs non doctorants, notamment Bertrand Gatti qui était souvent de la partie pour les repas et soirées avec les doctorants, Béatrice Pécassou, Sophie Barre ou Nicolas Bello. Enfin, je remercie Élodie Jean-Alphonse, dont l'accueil toujours souriant le matin rendait toujours la journée plus sympathique.

J'aimerais terminer en remerciant d'abord les superviseurs des stages que j'ai effectués au cours de mes études Aude Mongiatti et St John Simpson (British Museum, WC1B 3DG Londres, Royaume-Uni) puis Claire Pacheco (C2RMF, 75001 Paris, France), ainsi que les enseignants dont j'ai suivi les cours à Chimie ParisTech et Sorbonne Université qui m'ont fait découvrir et adorer l'étude des matériaux du patrimoine. Je remercie ensuite très chaleureusement mes amis et ma famille qui m'ont accompagné pendant ces trois ans, en particulier mes parents pour leur aide dans la chasse aux coquilles finales et ma sœur pour les belles photos qu'elle a été prendre pour moi au Musée Guimet (75116 Paris, France). Enfin, j'aimerais remercier tout spécialement Ariane Pinto, ancienne doctorante du CEMES, que j'ai rencontrée juste avant un séminaire le 14 mai 2019 à la suite duquel elle m'a présenté à son directeur de thèse : Philippe Sciau. Sans cette rencontre, je n'aurais sans doute pas mené cette étude qui m'a conduit à faire toutes ces merveilleuses rencontres et expériences que j'ai adoré faire et vivre.

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un doctorat de l'école doctorale Sciences de la Matière (ED 482), dont je remercie les membres, ainsi que Benoît Malard qui a été mon parrain de thèse pendant ces trois ans. Il a été financé dans le cadre du programme des thèses centralisées de la Direction Générale Déléguée à la Science du CNRS (80PRIME, Thèses transverses).

Avant-propos et conventions

1) *Avant-propos*

Les civilisations passées ont toujours été une fascination pour l'humanité. Les objets produits par les artisans des temps passés, miroirs voire parfois uniques témoins de ces cultures, constituent une mine d'informations pour renseigner les coutumes anciennes et compléter ou remettre en question les informations rapportées dans les écrits. Ils peuvent être utilisés comme supports pour les documenter à de nombreux niveaux, grâce à leur morphologie ou leurs décors qui illustrent par exemple les goûts et modes, ou grâce à leur méthode de fabrication qui renseigne les techniques et les usages des matières naturelles disponibles.

Avec les développements des outils analytiques, la science des matériaux a apporté un nouveau regard sur ces objets, en les considérant véritablement comme des sources primaires d'information. Ces analyses, associées aux sources plus traditionnelles (textes, représentations...), permettent d'apporter une nouvelle lumière sur les cultures pour les appréhender de manière plus globale.

Ce travail de thèse s'inscrit dans cette dynamique interdisciplinaire, à la croisée des chemins entre les sciences des matériaux et l'histoire de l'art et du patrimoine. Il se concentre sur les céramiques à glaçure noire et brune produites sous la dynastie Sòng (970-1279), avec une problématique de départ très large : comment décrire les glaçures de cette famille de céramiques ? Plusieurs questionnements ont été dégagés de cette dernière, attendant principalement à deux disciplines : d'une part à l'histoire de l'art, sur le contexte historique, social et culturel de ces productions à l'époque Sòng à l'échelle de l'empire et les classifications utilisées pour les décrire dans la littérature occidentale et chinoise ; d'autre part à la science des matériaux sur la caractérisation des compositions et microstructures de ces objets et l'étude de la croissance de cristaux et des conditions la favorisant dans leurs glaçures. Il se fonde ainsi en parallèle sur les analyses physico-chimiques de différentes glaçures anciennes de ce groupe, ainsi que celles d'échantillons de recreations modernes et d'éprouvettes fabriquées en conditions artisanales ou contrôlées, afin de documenter leur structure et la cristallisation de différentes espèces, en particulier celle de la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, du point de vue de la science des matériaux ; sous l'angle de l'histoire de l'art et du patrimoine, il s'intéresse à l'étude de la nomenclature utilisée pour les qualifier dans la littérature spécialisée.

2) *Conventions*

L'objet de ce travail étant la céramique chinoise, plusieurs noms chinois sont mentionnés dans le texte. De nombreux systèmes de romanisation du chinois standard existent et cohabitent depuis le XIX^e siècle (Pinyin, Wade-Giles, EFEO, Yale...). Par convention, la romanisation choisie pour transcrire les mots en chinois standard dans ce manuscrit est donnée en pinyin avec ton, système officiel adopté par l'organisation internationale de normalisation (ISO 7098). Ce système intègre les quatre tons du chinois standard, contrairement au pinyin sans ton assez souvent utilisé, avec une

orthographe généralement identique mais sans les tons. Quelques différences peuvent néanmoins être rencontrées, comme avec les provinces du Shaanxi et du Shanxi en pinyin sans ton qui s'écrivent respectivement Shǎnxī et Shānxī en pinyin avec ton. Dans le cas où des sources anciennes utilisent d'autres systèmes de romanisation, la romanisation en pinyin accentué est précisée entre crochets lorsqu'elle a pu être identifiée. De plus, les noms des collègues ou partenaires chinois qui ont contribué à cette étude sont donnés en pinyin sans ton.

En outre, ne parlant pas chinois, tous les raisonnements appuyés sur des sources écrites en cette langue ont été effectués à partir de traductions, soit publiées (notamment pour les textes anciens), soit réalisées et documentées avec des recherches complémentaires en chinois par Sophie Duhem.

Ce travail présente de nombreux résultats issus de diverses techniques d'analyse. Ces techniques sont citées avec les sigles anglais, par exemple SEM (Scanning Electron Microscopy) au lieu de MEB (Microscopie Électronique à Balayage), qui sont également utilisés couramment en français. Ces sigles seront systématiquement définis au moins lors de leur première occurrence.

Dans les images électroniques de sections transverses ou lames minces présentées où la surface de l'échantillon n'est pas visible clairement sur l'image, cette dernière est par convention vers le haut, sauf précision contraire. Dans le cas où cette surface est clairement visible, elle peut être orientée autrement que vers le haut, par exemple vers la droite de l'image sans mention explicite.

3) *Organisation du manuscrit*

Ce travail commence par une série de définitions pour rappeler les principales notions en rapport avec la céramique en général et questionner la pertinence des classifications traditionnellement utilisées pour l'étude des céramiques chinoises. Il est ensuite organisé en cinq chapitres, dont l'ordre a été choisi pour aborder successivement les questionnements d'ordre historique puis scientifique soulevés par la problématique générale de description des glaçures noires et brunes produites sous la dynastie Sòng :

Le **chapitre I** a pour objectif de replacer les céramiques noires et brunes de la dynastie Sòng dans l'histoire générale des céramiques à glaçure sombre fabriquées en Chine et dans le contexte de la société Sòng. Une étude des différents décors produits par les fours en activité sous cette dynastie, basée sur des catalogues de collection et d'exposition, ainsi que des ouvrages généraux sur la céramique Sòng y est également présentée.

Le **chapitre II** expose le cadre scientifique de ce travail. Il établit d'abord un état de l'art des études en science des matériaux menées sur les glaçures noires et brunes conçues par les artisans Sòng puis le corpus d'échantillons disponible. Il expose ensuite la stratégie analytique choisie au regard de ce dernier et se termine par la liste des outils d'analyse utilisés au cours de ce travail.

Le **chapitre III** se concentre sur les analyses effectuées sur les échantillons archéologiques. Il expose les résultats obtenus sur les différentes zones des échantillons (pâtes, glaçures et interfaces entre la pâte et la glaçure) afin de faire ressortir leurs points communs et leurs distinctions, et de dégager des problématiques d'étude.

Le **chapitre IV** regroupe les caractérisations réalisées sur des échantillons de reconstitutions, des éprouvettes tests fabriquées en conditions artisanales et sur des matières premières *in-operando* en

cours de cycle thermique afin de documenter notamment le mécanisme de cristallisation d'une espèce, la phase ϵ -Fe₂O₃, caractéristique des glaçures brunes fabriquées sous la dynastie Sòng.

Le **chapitre V** présente enfin des séries d'échantillons de matière première chauffée sous des conditions contrôlées afin d'étudier l'influence de plusieurs paramètres sur la cristallisation des espèces chimiques dans la glaçure et à l'interface entre la pâte et la glaçure.

Enfin, une conclusion reprend les résultats principaux de ce travail et propose des perspectives. Ce document se termine par la bibliographie des références citées et par des annexes apportant des informations complémentaires au texte.

Table des matières

Remerciements	1
Avant-propos et conventions	5
1) Avant-propos.....	5
2) Conventions.....	5
3) Organisation du manuscrit.....	6
Table des matières	9
Introduction : Généralités sur la céramique	13
A – Définitions	13
1) Le mot « céramique ».....	13
2) Lexique en rapport avec la céramique.....	14
B – Classifications des céramiques	17
1) Classifications occidentales.....	17
2) Limites des classifications occidentales.....	19
3) Classifications chinoises.....	22
Chapitre I : Les céramiques noires et brunes en Chine	23
A – Céramiques noires et brunes Pré-Sòng	23
1) Céramiques chinoises primitives et oxyde de fer.....	23
2) Développement des premières glaçures noires.....	24
3) Céramiques noires et brunes de la dynastie Táng.....	25
B – Société et esthétique Sòng	26
1) De la dynastie Táng à la dynastie Sòng.....	26
2) Transformations sociales sous les Sòng.....	28
3) Situation géopolitique et économique sous les Sòng.....	30
4) Conséquences de ce contexte sur la céramique.....	34
5) Esthétique et art céramique Sòng.....	37
C – Céramiques noires et brunes Sòng	39
1) Céramiques noires et brunes Sòng.....	39
2) Nomenclature des céramiques brunes et noires.....	43
* Glaçures monochromes	44
* Glaçures à décors abstraits	46
* Glaçures à décors figuratifs	51
D – Céramiques noires et brunes après la dynastie Sòng	54
1) Céramiques noires et brunes sous les dynasties postérieures aux Sòng.....	54

2) Céramiques noires et brunes actuelles inspirées des productions Sòng.....	54
Chapitre II : Contexte scientifique et méthodes.....	57
A – Céramiques noires et brunes Sòng dans la littérature en sciences des matériaux	57
1) État de l’art.....	57
2) Problématique relevant des sciences des matériaux.....	60
B – Présentation du corpus étudié.....	61
1) Échantillons issus de céramiques archéologiques.....	61
2) Échantillons issus de créations modernes.....	64
3) Éprouvettes tests artisanales modernes.....	64
4) Matières premières.....	65
5) Objets issus de collections muséales.....	67
6) Tableau récapitulatif et commentaires.....	68
C – Stratégie d’analyse.....	69
1) Présentation générale de la stratégie.....	69
2) Contraintes liées aux échantillons étudiés.....	70
3) Analyses effectuées.....	71
D – Conditions d’analyses et paramètres expérimentaux.....	72
1) Préparation et élaboration d’échantillons.....	72
* Préparation de sections transverses.....	72
* Préparation d’échantillons métallisés.....	73
* Préparation de lames minces par FIB.....	73
* Élaboration d’échantillons de matière première chauffée.....	74
2) Techniques analytiques et d’imagerie.....	77
* Imageries et microscopies optiques.....	77
* Diffraction des rayons X conventionnelle (XRD).....	78
* Diffraction des rayons X in-operando (XRD in-operando).....	79
* Spectroscopie Raman.....	79
* Microscopie électronique à balayage et caractérisations associées (SEM-EDS-TKD).....	79
* Microscopie électronique en transmission et caractérisations associées (STEM-EDS-ACOM).....	80
* Émission de rayons X induite par proton (PIXE).....	80
* Spectrométrie par fluorescence des rayons X (XRF).....	81
Chapitre III : Analyses des tessons et objets archéologiques.....	83
A – Caractérisation des pâtes.....	83
1) Observations optiques.....	83
2) Caractérisation chimique.....	84
3) Caractérisation structurale.....	87
4) Bilan.....	89
B – Caractérisation générale des glaçures.....	89
1) Observations optiques.....	89

2) Caractérisation structurale.....	94
* <i>Caractérisation structurale systématique par XRD</i>	94
* <i>Caractérisation locale par Spectroscopie Raman</i>	97
3) Microstructure.....	100
4) Caractérisation chimique.....	104
* <i>Composition globale</i>	104
* <i>Stratigraphie et profil de composition</i>	107
5) Bilan.....	109
C – Interface entre la pâte et la glaçure.....	110
1) <i>Caractérisation chimique globale</i>	110
2) <i>Caractérisation fine des interfaces</i>	110
3) Bilan.....	112
D – Objets de musée.....	113
1) <i>Observations optiques</i>	113
2) <i>Caractérisation structurale</i>	114
Bilan global et problématiques émergentes.....	114
1) Bilan.....	114
2) <i>Problématiques</i>	115
Chapitre IV : Études en température et des recreations.....	117
A – Caractérisation des matières premières.....	117
1) <i>Observations optiques</i>	117
2) <i>Caractérisation chimique</i>	118
3) <i>Caractérisation structurale</i>	119
B – Étude des éprouvettes de la série ZJ.....	120
1) <i>Observations optiques et caractérisation structurale globale</i>	120
2) <i>Caractérisation structurale et chimique locale</i>	122
3) <i>Étude détaillée de ZJ-07</i>	124
4) <i>Mise en équation du mécanisme de croissance</i>	130
5) <i>Étude détaillée de ZJ-08</i>	131
6) Bilan.....	138
C – Suivi en température <i>in-operando</i>.....	139
1) <i>Détermination de la température du milieu réactionnel</i>	139
2) <i>Étude en température</i>	140
D – Étude des recreations noires à reflets bleus.....	142
1) <i>Observations optiques</i>	142
2) <i>Caractérisation chimique et structurale</i>	143
Bilan global.....	145
Chapitre V : Étude de l'influence d'une sélection de paramètres environnementaux.....	147

A – Influence de l’atmosphère et de la durée du cycle thermique sur la surface de la glaçure.....	147
1) <i>Observations optiques et caractérisation globale.....</i>	147
2) <i>Dendrites d’oxydes de fer.....</i>	152
3) <i>Cristaux d’indialite.....</i>	157
4) <i>Spinelle, nanoparticules et mullite.....</i>	160
5) <i>Cristaux géométriques riches en fer.....</i>	162
6) <i>Bilan.....</i>	164
B – Influence de la vitesse de refroidissement, de la composition de la matière première et de la température maximale atteinte sur la surface de la glaçure.....	165
1) <i>Observations optiques.....</i>	166
2) <i>Caractérisation par spectroscopie Raman.....</i>	169
C – Influence de la vitesse de refroidissement, de la composition de la matière première et d’un dégourdi de la pâte sur l’interface entre la pâte et la glaçure.....	171
1) <i>Influence de la composition de la matière première.....</i>	171
2) <i>Influence de la vitesse de refroidissement.....</i>	172
3) <i>Influence du dégourdi de la pâte.....</i>	173
4) <i>Bilan.....</i>	174
Conclusion et perspectives.....	175
1) <i>Rappel des objectifs.....</i>	175
2) <i>Principaux résultats.....</i>	175
3) <i>Perspectives.....</i>	177
Bibliographie.....	179
Annexes.....	193
Liste des Annexes.....	193
Annexe 1 : Introduction à la consommation du thé sous la dynastie Sòng.....	194
1) <i>Consommation du thé avant la dynastie Sòng.....</i>	194
2) <i>Consommation du thé sous les Sòng.....</i>	194
3) <i>Influences de l’art du thé Sòng.....</i>	195
Annexe 2 : Étude de la nomenclature des glaçures noires et brunes dans la littérature spécialisée.....	197
Annexe 3 : Corpus détaillé des échantillons disponibles.....	252
Annexe 4 : Compositions élémentaires mesurées par PIXE.....	260
Annexe 5 : Affinements par la méthode de Rietveld.....	263

Introduction : Généralités sur la céramique

A – Définitions

1) Le mot « céramique »

Le mot « céramique » dérive du nom grec « ὀ κέραμος », qui a pour premier sens la terre de potier/l'argile, puis par extension tout objet fabriqué en terre cuite (vaisselle, tuile, brique) [1] ou de l'adjectif « κεραμικός » signifiant d'argile [2]. Cette étymologie est particulièrement intéressante car elle propose pour origine du mot la matière première utilisée dans l'art ou la conception des objets qualifiés comme tels, qui sont les deux significations actuelles du mot céramique (voir le paragraphe suivant). Il a été suggéré que ce mot grec dériverait lui-même du mot « τὸ κέρας » qui signifie la corne d'animal¹ qui était utilisée comme récipient pour la boisson dans certaines civilisations [3,4]. Le Grand Baillit, dictionnaire de référence pour la traduction du grec antique, propose d'ailleurs « vase à boire » comme sens II-3 pour l'entrée « τὸ κέρας » [5]. Aucun lien explicite n'est cependant effectué dans cet ouvrage entre les entrées « ὀ κέραμος » et « τὸ κέρας ».

Devenu un mot commun de la langue française relativement tardivement, « céramique » n'apparaît dans le dictionnaire de l'Académie Française qu'à partir de sa septième édition parue en 1878. Malgré cette entrée tardive dans le langage courant, il semble que des mots de même racine ont été utilisés antérieurement, par exemple « céramite » pour désigner la terre à potier chez Rabelais [6] (de « κεραμίτις » signifiant également d'argile [7]). Son utilisation semble prendre de l'importance au cours du XIX^e siècle, ce qui explique son entrée dans le dictionnaire de l'Académie Française à cette période. Lors de son entrée dans le dictionnaire, « céramique » est défini comme un adjectif désignant ce « qui concerne l'art du potier » et un substantif féminin pour qualifier l'art directement [8]. On retrouve ce mot dans de nombreux ouvrages du XIX^e siècle [3,9,10] et cet art a même droit à un dictionnaire pour collectionneur en 1893 [11]. Ce n'est que dans sa neuvième édition, dont la rédaction a commencé en 1986, que le sens métonymique de « céramique », c'est-à-dire l'utilisation du mot pour qualifier les objets fabriqués par cet art, est entré dans le dictionnaire de l'Académie Française [12].

Aujourd'hui, « céramique » qualifie ainsi tant « l'art de fabriquer des objets en terre cuite, faïence, porcelaine, grès, etc., et de les décorer » que la « matière obtenue par cuisson de la terre » ou l'« objet fabriqué en terre cuite » [12]. En partant de ces définitions, trois sens principaux se dégagent : un sens manuel pour qualifier l'art, un sens métonymique pour qualifier les objets et un sens technique pour qualifier le matériau. Cette richesse de sens cachée derrière le terme « céramique » s'est traduite par une utilisation de ce mot dans de nombreux domaines comme les sciences humaines, les arts plastiques ou les sciences des matériaux optant pour des définitions avec une emphase particulière sur l'un de ces aspects en fonction des besoins de la discipline.

1- Cette racine est retrouvée par exemple dans le mot kératine.

On trouve ainsi couramment des définitions ne prenant en compte par exemple que l'aspect matériel comme « objet en terre qui a subi une cuisson de manière à le solidifier » [13] ou donnant des précisions supplémentaires comme « matériaux inorganiques obtenus à partir de mélanges de poudres fines de matières premières minérales broyées, compactées et soumises à une cuisson à haute température, généralement entre 800 et 1500°C » [14].

Ces quelques exemples permettent d'entrevoir les nombreux sens de « céramique ». Ainsi, il est important de préciser qu'il est employé dans la suite de cette étude pour qualifier de manière indifférente à la fois les objets (sens métonymique) et le matériau (sens technique). Pour proposer une définition adaptée à cette étude, il s'agit d'un objet ou du matériau façonné par un artisan à partir de matière minérale crue qui est ensuite chauffée.

2) *Lexique en rapport avec la céramique*

Cette proposition de définition en apparence relativement simple cache une réalité bien plus complexe car les céramiques peuvent être décomposées en plusieurs divisions dont chacune répond à une terminologie plus ou moins compliquée. En effet, la céramique faisant l'objet de nombreuses études dans des domaines variés, une multiplication du vocabulaire pour qualifier des divisions comparables peut être observée, avec un ajout de subtilités parfois contradictoires entre deux domaines.

Dans l'introduction d'une étude de 1898, M. Coupeau, ingénieur civil des mines, distingue de manière claire les deux divisions principales que l'on retrouve dans les céramiques : « les objets céramiques se composent essentiellement d'une **pâte** argileuse cuite, mais non fondue, poreuse dans les poteries et les faïences, en partie vitrifiée et compacte dans les grès et les porcelaines, qui forme le corps de l'objet ; d'une **couverte** complètement fondue, qui garde, le plus souvent, après refroidissement, l'état vitreux » [15].

La pâte (en anglais « body », en chinois « tāi » (胎)) est la partie de la céramique qui est directement façonnée par l'artisan afin de donner à l'objet la forme qu'il désire avant la cuisson. Elle est généralement constituée d'un mélange d'une matière plastique facilement travaillable à la main (typiquement une argile) et d'une matière dégraissante (du sable ou des débris de poterie mis en poudre par exemple). On y ajoute parfois des matières fondantes comme des feldspaths ou des calcaires [3]. Comme indiquée par Coupeau, la pâte garde en général une certaine porosité après sa cuisson.

La pâte est souvent recouverte d'une couche vitreuse (en anglais « glaze », en chinois « yòu » (釉)) qui présente à la fois un intérêt pratique (rendre l'objet imperméable aux liquides) et une dimension esthétique [3]. Cette couche en particulier est désignée par de nombreux termes, comme couverte, émail, vernis, ou encore glaçure, dont la signification exacte est dépendante de la communauté, voire de la personne qui l'utilise.

La couverte, terme utilisé par Coupeau, est un mot dont le sens littéral est large, puisqu'il désigne n'importe quelle couche recouvrant un objet. Ce sens très large est souvent utilisé en archéologie, alors que les autres disciplines utilisent des définitions bien plus restreintes. C'est le cas par exemple de celle qui apparaît dans la quatrième édition du dictionnaire de l'Académie Française de 1762, où couverte est définie comme un « émail qui couvre une terre cuite mise en

œuvre. Il se dit particulièrement de la porcelaine » [16]. Cette définition est restée inchangée jusque dans l'édition actuelle de ce dictionnaire où il est précisé qu'il s'agit d'un émail transparent et l'association à la porcelaine est élargie aux faïences également [17]. L'association de couverte avec la transparence est également mentionnée par Daisy Lion-Goldschmidt, chargée de mission au Musée Guimet et spécialiste de la céramique chinoise, qui associe la couverte avec les porcelaines comme l'Académie Française mais avec les grès au lieu des faïences [18]. Alexandre Brongniart, minéralogiste, géologue et administrateur de la Manufacture de porcelaine de Sèvres entre 1800 et 1847, donne quant à lui la définition plus technique : « enduit vitrifiable, terreux, qui se fond à une haute température égale à celle de la cuisson de la pâte » [3]. Cette définition est partagée par Michel Beurdeley, expert en art d'Extrême-Orient, qui propose « enduit vitreux qui cuit en même temps que l'objet » [19]. Brongniart est cependant un plus précis quant au type d'objets sur lesquels la couverte est appliquée, en l'associant aux porcelaines et aux grès comme Lion-Goldschmidt. Cependant, contrairement à elle, il ne fait aucune association entre couverte et transparence. Le dictionnaire Larousse propose quant à lui la définition « enduit vitrifiable, transparent, incolore ou coloré, dont on recouvre les porcelaines et les grès pour leur donner un aspect brillant » [20]. Cette définition ajoute aux propositions de l'Académie Française et Lion-Goldschmidt que « couverte » peut désigner une couche colorée ou incolore, ce qui peut contrarier l'aspect transparent selon l'intensité de cette coloration. Pour Antoine d'Albis, chimiste en chef à la Manufacture de Sèvres depuis 1988, couverte est utilisé « pour désigner l'enduit vitrifié qui recouvre les porcelaines ». Il note que même si ce mot est toujours utilisé couramment, il est aujourd'hui « très désuet » [21].

D'Albis mentionne l'utilisation du mot émail pour « signifier la même chose » que couverte par les industriels, qui permet la commodité additionnelle d'utiliser le verbe « émailler ». Il note que les historiens de l'art s'en servent de manière beaucoup plus restrictive, uniquement « pour désigner le produit vitrifié, blanchi et opacifié par l'oxyde d'étain qui recouvre les céramiques poreuses » [21]. Cette définition plus restrictive est également utilisée par Brongniart qui l'associe généralement aux faïences, et indique clairement qu'il n'est pas synonyme de couverte [3]. Il s'agit d'un mot plus ancien que couverte qui apparaît dès la première édition du dictionnaire de l'Académie Française paru en 1694, qui est d'ailleurs utilisé pour définir couverte (voir le paragraphe précédent). Alors orthographié « esmail », il est utilisé pour qualifier principalement les ouvrages de verres sur métaux [22]. C'est à partir de la deuxième édition du dictionnaire parue en 1718 que la porcelaine est évoquée dans l'exemple « une porcelaine est d'un bel esmail » pour qualifier la beauté des couleurs de son décor et non la couche vitreuse en général [23]. Le mot perd son "s" pour prendre la forme que l'on lui connaît à partir de la troisième édition de 1740 [24], mais la définition reste la même jusqu'à la sixième édition de 1835 où l'association avec la couche vitreuse sur céramique est donnée de manière explicite « l'émail de la porcelaine, l'enduit vitreux dont on la recouvre, et qui est souvent orné de diverses couleurs. On dit dans un sens analogue, l'émail de la faïence » [25]. Dans l'édition en rédaction actuellement, une définition plus technique est proposée : « Matière incolore, transparente ou opaque, obtenue par la vitrification de divers minéraux, qui peut être colorée par des oxydes métalliques et qu'on applique par fusion sur certains ouvrages de métal, de terre cuite, de verre, pour les orner » [26]. Cette définition s'oppose à celle de Brongniart en proposant que l'émail peut être transparent. Lion-Goldschmidt explique quant à elle que les émaux contiennent une quantité particulièrement importante de fondant et sont ainsi réservés aux décors de petit feu. Elle rejoint Brongniart en disant qu'ils sont « presque toujours opaques » [18], tout comme

Guignet et Garnier qui différencient les émaux des verres « par leur opacité et par des colorations toutes spéciales » [4].

En plus de distinguer émail de couverte, Brongniart désigne un troisième type de couche vitreuse qu'il appelle vernis et définit comme « tout enduit vitrifiable, transparent et plombifère qui se fond à une température basse et ordinairement inférieure à la cuisson de la pâte » [3]. Il associe ce type de couche aux poteries communes et aux faïences fines. Ce terme semble avoir été utilisé pour qualifier la couche vitreuse par comparaison avec la brillance des meubles en bois vernissés. La référence à la céramique dans la définition de vernis n'apparaît qu'à partir de la cinquième édition du dictionnaire de l'Académie Française parue en 1798 [27]. Contrairement à ces deux définitions, Lion-Goldschmidt explique que les vernis sont véritablement « à base de résine » et utilisés pour rendre les céramiques imperméables et brillantes [18]. En archéologie, ce terme est couramment utilisé pour désigner les décors noirs des vases gréco-romains.

Enfin le mot glaçure est également utilisé pour qualifier cette couche. Emprunté à l'allemand « Glasur » [28], il apparaît dans le dictionnaire de l'Académie Française uniquement depuis l'édition actuellement en rédaction, bien qu'il soit utilisé déjà couramment par Brongniart en 1844 [3,29]. Il semble que ce mot ait été utilisé comme synonyme de couverte par plusieurs auteurs de la fin du XIX^e siècle chez lesquels on peut lire « glaçure ou couverte » en opposition à émail ou vernis [4,9]. Cependant il se peut qu'il soit également utilisé avec un sens plus large, comme le suggère l'utilisation de Brongniart, qui regroupe couverte, émail et vernis dans un article intitulé « glaçures en général » [3] ou comme le suggère Beurdeley en expliquant qu'il s'agit d'« un terme plus général, qui désigne les matières vitreuses enrobant les céramiques » [19]. Pour d'Albis, la glaçure s'oppose à l'émail des historiens de l'art du fait qu'elle est transparente et ne contient pas d'oxyde d'étain [21]. Enfin pour Lion-Goldschmidt, les glaçures sont transparentes et colorées avec divers oxydes métalliques. Il s'agit de décors de « demi-grand feu », ce qui les rend beaucoup plus liquide que ce qu'elle qualifie de couverte pendant la cuisson et permet de garder une séparation nette entre cette couche et la pâte [18]. La glaçure constitue ainsi pour elle une catégorie distincte et n'est pas un terme plus général que couverte, émail ou vernis.

Comme le montre la diversité des définitions parfois contradictoires données ci-dessus, il est difficile d'appréhender clairement la différence entre glaçure, émail, couverte et vernis. Ces distinctions ont d'ailleurs « conduit à maintes querelles d'experts » comme l'explique d'Albis [21]. Ces termes étaient déjà régulièrement confondus ou utilisés comme synonymes à la fin du XIX^e siècle comme l'illustre ces deux exemples : « On dit même, dans les fabriques de poteries, l'émail pour la couverte ou le vernis. » [4], « Pour la glaçure, nommée couverte, on emploie le feldspath quartzeux [...]. Cet enduit fusible, ce verre ou émail, reçoit, le plus souvent, la décoration peinte qui y adhère. » [10].

Ainsi, pour éviter de plonger davantage dans ces problèmes insolubles de vocabulaire, le mot choisi dans cette étude pour qualifier la couche vitreuse recouvrant la pâte est glaçure, quel que soit son aspect. Celle-ci peut-être appliquée sur la pâte avant la cuisson ou après une première cuisson, appelée dégourdi, en fonction de sa composition et l'effet recherché par l'artisan. Cette application sur la pâte peut être effectuée par divers procédés, comme le trempage (ou immersion) de la pièce dans un bain de glaçure crue [3,18], l'insufflation de la glaçure crue à l'aide d'un bambou fermé à

une extrémité par une gaze [9,18] ou l'arrosage qui consiste à verser directement la glaçure crue sur l'objet à émailler [3].

La pâte et la glaçure sont les deux divisions les plus courantes des céramiques. Elles ne sont néanmoins pas les seules possibles : il est en effet possible de séparer certains types de décors des glaçures par exemple. Une autre division assez commune dans les céramiques est l'engobe. Il s'agit d'une mince couche minérale (d'argile ou d'ocre) blanche ou colorée appliquée directement sur la pâte crue qui sert à masquer les imperfections de la pâte en la faisant paraître plus fine ou plus blanche qu'elle n'est en réalité [3,18]. Il peut être utilisé comme finition de surface mais également comme fond de décor peint ou sous glaçure afin de renforcer l'éclat de cette dernière [10,18,30]. Dans le cas de l'utilisation du sens littéral du mot couverte, un engobe peut être tout à fait considéré comme couverte, comme le montre la définition « couverte de nature argileuse » proposée par André D'Anna, directeur de recherche spécialisé dans le néolithique [30].

B – Classifications des céramiques

1) Classifications occidentales

Comme le suggèrent plusieurs définitions présentées dans la partie précédente, il existe également différents noms pour qualifier les céramiques selon leur aspect, comme la porcelaine, le grès ou la faïence. Ces noms sont issus de classifications, dont la plus souvent utilisée comme référence en France est celle de la Manufacture de Sèvres, établie pour la première fois par Bongniart en 1844.

Cette classification est avant tout une classification scientifique, établie en considérant principalement les propriétés physiques des céramiques et la composition chimique des matières premières, comme il l'indique dans la préface de son traité des Arts Céramiques : « J'ai donc tenté de classer d'une manière rationnelle les produits céramiques, [...] j'ai cru devoir examiner quels étaient en général les principes de composition qui distinguaient réellement entre eux les produits céramiques, et prendre ces différences essentielles pour base de ces distinctions. » [3]. En effet d'après lui, les noms donnés aux céramiques jusqu'alors étaient souvent donnés de manière arbitraire par les artisans ou les collectionneurs : « cette variation n'était souvent qu'apparente et tenait plutôt aux noms donnés par le charlatanisme qu'à un principe de véritable différence ; que, par exemple, la prétendue porcelaine opaque, n'était porcelaine que de nom, et par l'idée plus spéculative que logique du fabricant qui avait cru relever la position de sa poterie par ce nom ambitieux. Sans donc m'inquiéter de tous ces noms [...] appliqués comme au hasard à des poteries » [3].

Il propose ainsi, à partir de ses observations, de ranger les céramiques dans neuf ordres répartis entre trois classes : les poteries à pâte tendre, les poteries à pâte dure et opaque et les poteries à pâte dure et translucide. Pour établir ces classes et ordres, ce spécialiste s'est basé principalement sur deux propriétés physiques des pâtes des céramiques : leur dureté et leur opacité. Un résumé du résultat de sa classification est présenté dans le Tableau 1 ci-dessous.

Classe		Ordre	
I.	Poterie à pâte tendre	1 ^{er}	Terre cuite
		2 ^e	Poterie lustrée
		3 ^e	Poterie vernissée
		4 ^e	Poterie émaillée
II.	Poterie à pâte dure opaque	5 ^e	Faïence fine
		6 ^e	Grès cérame
III.	Poterie à pâte dure translucide	7 ^e	Porcelaine dure (ou chinoise)
		8 ^e	Porcelaine tendre naturelle (ou anglaise)
		9 ^e	Porcelaine tendre artificielle (ou française)

Tableau 1 : Résumé de la classification des céramiques proposée par Brongniart [3]

La classe I, poterie à pâte tendre, se différencie des deux autres par sa dureté inférieure aux classes II et III. Les classes II et III, poteries à pâte dure respectivement opaque ou translucide, dont la dureté est « commune », se différencient quant à elles par leur opacité. Même si les ordres présentés ci-dessus sont basés sur les observations de ces deux propriétés, Brongniart ne néglige pas pour autant les aspects archéologiques, historiques ou pratiques des objets. En effet, chaque ordre décrit dans son traité est associé d'abord à une définition assez brève de ses propriétés, suivi d'une description plus exhaustive contenant des exemples d'objets et de méthodes de fabrication, ainsi qu'une liste de lieux et des époques où les céramiques de cet ordre étaient fabriquées. Il introduit également des sous-ordres lorsque cela lui semble nécessaire.

Cette classification n'est bien sûr pas la seule qui existe pour catégoriser les différentes céramiques. Comme l'indique son auteur, sans d'ailleurs se priver de railler leur utilisation qualifiée de « au hasard », les mots faïence, grès ou porcelaine étaient déjà utilisés auparavant en France pour différencier les céramiques entre elles, souvent par rapport à leur aspect visuel général. Elle est très liée à la Manufacture de porcelaine de Sèvres et la manière dont les céramiques y étaient produites. Elle reste néanmoins relativement proches des classifications établies dans d'autres pays européens, comme la saxonne décrite par Hamer et Hamer citée par Joseph Needham, biochimiste et sinologue spécialiste de l'histoire des techniques en Chine, qui distingue également trois classes de céramiques : « earthenware », « stoneware » et « porcelain » [31]. Pour ces auteurs, la différence entre « earthenware » et « stoneware » tient principalement à la porosité plus ou moins importante de la pâte et « porcelain » est définie comme translucide et cuite à une température supérieure à 1300°C. Malgré la définition de ces classes avec ces critères différents, le résultat est similaire à la classification de Brongniart et on peut généralement associer « earthenware » avec poterie à pâte tendre, « stoneware » avec poterie à pâte dure opaque et « porcelain » avec poterie à pâte dure translucide, à quelques exceptions près.

Avec le temps, de nombreux domaines comme les sciences industrielles, l'archéologie ou l'histoire de l'art se sont appropriés ces différentes classes et ont éventuellement adapté la définition de certains de leur ordres de manière à mieux répondre aux besoins spécifiques de leur disciplines. La découverte de nouveaux objets archéologiques, en particulier certaines céramiques chinoises qui ne rentraient pas exactement dans les ordres existants a également contribué à ces adaptations, voire

à la création de nouvelles catégories intermédiaires, par exemple la proto-porcelaine ou le grès porcelaineux.

2) *Limites des classifications occidentales*

Comme évoqué au-dessus, les céramiques chinoises font souvent partie des objets dont la classification est débattue, en particulier pour la distinction entre le grès et la porcelaine dure. Cette difficulté à faire correspondre correctement ces céramiques aux classes proposées par les savants occidentaux peut être interprétée comme une accumulation de facteurs principalement dus aux différences entre les visions européennes et chinoises des céramiques.

L'une des origines principales de ces facteurs est sans doute le véritable engouement pour la porcelaine importée de Chine lors de son introduction en Europe par les portugais en 1508, selon les sources du XIX^e siècle [9,10]. Comme on peut l'attendre de la découverte d'objets inédits d'une telle qualité, « les porcelaines suscitèrent une incroyable émulation parmi les industriels et les savants » [10], conduisant à de nombreuses études pour percer les mystères de sa fabrication. Des descriptions ont été effectuées sur place dès le XVI^e siècle, avec par exemple la description de Gaspar Da Cruz, missionnaire dominicain portugais de passage en Chine en 1556 [32] ou la description détaillée de sa fabrication à jǐngdézhen (Jiāngxī) par le père François-Xavier d'Entrecolles, missionnaire jésuite français, deux siècles plus tard [33]. De nombreuses études ont également été menées en parallèle en occident pour tenter de la décrire exhaustivement et percer ses secrets de fabrication, à partir d'analyses scientifiques ou des textes chinois comme le Jǐngdézhen tàolù [Annales des céramiques de Jǐngdézhen] traduit par Stanislas Julien [34].

La première difficulté évidente à laquelle les savants occidentaux qui s'intéressaient à la porcelaine ont été confrontés est la traduction de la langue chinoise. Il semble effectivement que les mots « táo » (陶), « yáo » (窑) et « cí » (瓷) ont été parfois traduits de manière indistincte par porcelaine [34]. Ces confusions de traductions sont d'ailleurs acerbement déplorées par certains auteurs du XIX^e siècle comme Grandidier qui écrit « Stanislas Julien traduit indistinctement thao [i.e. táo] et yao [i.e. yáo] par porcelaine ; les conséquences de cette interprétation vicieuse sont incalculables » [9].

Il semble néanmoins que les sources du XVIII^e et XIX^e siècles s'accordent le plus souvent pour faire correspondre porcelaine au mot cí (ou à l'expression « cí qì » (瓷器) qui peut être traduite par objet ou vase en porcelaine, en céramique [35]), comme on peut le lire chez le père d'Entrecolles en 1712 : « La porcelaine s'appelle communément à la Chine steki [i.e. cí qì] » [33], Brongniart en 1844 : « La porcelaine s'appelle en chinois Tse ki [i.e. cí qì] » [36], Jacquemart et Le Blant en 1861 : « En Chine, selon Alex. Brongniart, la poterie kaolinique le nomme tse [i.e. cí] ou tse-ki [i.e. cí qì] ; cette dernière expression semble devoir s'appliquer à une espèce particulière ; yao [i.e. yáo] est, au contraire, un nom générique qui désigne en même temps l'objet fabriqué & le four à cuire. » [10] ou encore Grandidier en 1894 : « En Chine, la porcelaine s'appelle tsé, tseu [i.e. cí] » [9].

Ces problèmes de traductions sont exacerbés par un emploi beaucoup plus restrictif du mot porcelaine en occident par rapport au mot cí, qui en réalité désigne plutôt les céramiques cuites à haute température, soit une catégorie bien plus large que la seule porcelaine [31]. Cette distinction était d'ailleurs déjà remarquée au XIX^e siècle par Grandidier qui notait avec condescendance que cí

« en réalité, n'est-il pas l'équivalent parfait de notre terme français; il s'applique à la porcelaine de bonne qualité, mais rigoureusement il signifie « poterie fine, poterie de choix » » [9].

A ces difficultés liées à la différence entre les deux langages, il s'est ajouté que le mot porcelaine d'une part existait avant la découverte de la porcelaine de Chine, il était ainsi utilisé afin de qualifier d'autres types d'objets, d'autre part qu'il a servi à décrire davantage d'objets que les porcelaines chinoises après leur découverte. Cette utilisation élargie est notée par Jacquemart et Le Blant : « ce nom a-t-il été exclusivement consacré aux produits céramiques qui le portent aujourd'hui ? Évidemment non. » [10]. En effet, avant d'être utilisé pour qualifier des céramiques, il semble que porcelaine, parfois orthographié pourcelaine, était usité pour qualifier des gemmes, comme le suggèrent par exemple l'inventaire du duc d'Anjou de 1360 « Une escuelle d'une pierre appelée pourcelaine » et l'inventaire de Charles V « Une petite pierre de pourcelaine entaillée à six petiz ymages garnye d'or », qui correspondent d'après Jacquemart et Le Blant à des pierres semi-précieuses transparentes comme de la calcédoine, de l'alabastrite ou du jade blanc [10]. Il était également utilisé pour qualifier des plantes comme le pourpier, comme le suggère l'entrée porcelayne (redirection depuis pourcelaine) du dictionnaire de la langue française du XVI^e siècle [37] ou des coquillages du genre *cypræa* : « Ce nom porcelaine est donné à plusieurs coquilles de mer » [10]. Enfin, porcelaine a été également utilisé pour qualifier d'autres céramiques de moyenne facture ou des imitations afin de profiter des connotations luxueuses et exotiques associées aux porcelaines chinoises, comme le notent Jacquemart et Le Blant : « vers le milieu du XVI^e siècle, lorsque la poterie orientale commençait à se répandre, un brillant artifice de langage vient troubler la nomenclature céramique en appliquant le mot porcelaine à des produits indignes de le porter. » [10] ou Brongniart : « la prétendue porcelaine opaque, n'était porcelaine que de nom, et par l'idée plus spéculative que logique du fabricant qui avait cru relever la position de sa poterie par ce nom ambitieux. » [3].

Un dernier niveau d'ambiguïté est apporté par la volonté d'usiter porcelaine pour décrire les objets présents dans les collections occidentales. En effet bien que Brongniart donne une définition précise de la porcelaine, il s'agit d'une définition très adaptée à la science des matériaux et la production de céramique : « La Poterie de cet ordre est caractérisée par une pâte fine, dure, translucide, et une glaçure dure, terreuse, nommée couverte. La pâte est essentiellement composée de deux éléments principaux : l'un, argileux infusible, c'est le kaolin, ou seul ou associé, soit avec de l'argile plastique, soit avec la magnésite ; l'autre, aride, infusible, est donné par le felspath ou d'autres minéraux pierreux, tels que le sable siliceux, la craie, le gypse, ou pris séparément, ou réunis ensemble de diverses manières. La glaçure nommée couverte consiste en felspath quarzeux, tantôt seul, tantôt mêlé avec du gypse, mais toujours sans plomb ni étain. » [36].

Ainsi, l'appropriation de cette définition par les collectionneurs pour décrire leurs objets est parfois très personnelle. Un bon exemple pour illustrer l'importance de l'interprétation des auteurs est la diversité de dates proposée pour l'apparition de la porcelaine au vu de l'aspect des objets anciens. Comme le résume Robert Finlay, professeur d'histoire à l'université de l'Arkansas : « Depending upon which modern account one reads, porcelain emerged in any one of the periods of Chinese history from the Zhou (1027-221 b.c.e.) to the Yuan »² [38]. Certains auteurs proposent

2- *traduction* : selon le récit moderne que l'on lit, la porcelaine est apparue à n'importe quelle époque de l'histoire chinoise entre la Dynastie Zhōu et la Dynastie Yuán.

même des dates antérieures à la Dynastie Zhou, remontant jusqu'à 1800 av. J.-C. pour Rosellini, Wilkinson et David [34]. Pour citer quelques autres exemples, on trouve chez Guignet et Garnier qui expliquent à propos du kaolin que « les Chinois s'en servaient couramment pour fabriquer leurs superbes porcelaines, dès le VI^e siècle avant l'ère chrétienne. » [4], dans la préface de Julien que « ce fut seulement sous les Han que la porcelaine prit naissance dans le pays de Sin-p'ing [transcription en pinyin non trouvée] » [34] ou Grandidier qui explique : « je ne placerai pas les origines de la porcelaine au temps de l'empereur Chun qui gouvernait la Chine 2255 ans avant l'ère chrétienne. [...] la poterie, la terre émaillée ne sont pas la porcelaine telle que nous la connaissons, et la seule porcelaine, qui mérite ce nom, date du commencement de la dynastie des Song [Sòng] » [9].

Selon ce dernier, ces écarts s'expliquent par la volonté des auteurs de reculer l'apparition de la porcelaine pour lui donner une valeur ancestrale supplémentaire : « On est généralement porté, pour les hommes et pour les objets d'art, à reculer leur origine jusqu'aux temps les plus lointains ; on leur attribue une antiquité fabuleuse comme si cette ancienneté, plus ou moins fictive, devait accroître leur valeur naturelle. [...] La porcelaine a subi la loi commune ; pourtant elle n'a nullement besoin d'une antiquité antédiluvienne pour figurer avec honneur dans le monde » [9].

Ces différences de datations dépendent également du sens d'emploi de porcelaine (comme défini par les occidentaux ou comme traduction de *cí*). En effet, comme l'explique Beurdeley en parlant de céramique blanche produite sous la Dynastie Shāng : « les chinois considèrent que les potiers Shang ont découvert le secret de la porcelaine, "ci" en chinois, puisqu'ils fabriquaient ces grès kaoliniques, non poreux, durs, d'une sonorité musicale à la percussion. Pour les occidentaux, ces grès ne sont pas de la porcelaine, céramique très raffinée, à base de kaolin et de feldspaths, qui, après la cuisson, doit être non seulement dure et sonore, mais aussi translucide. » [19]. Une telle différence s'observe également dans le travail de traduction de Julien qui utilise volontiers des expressions comme « porcelaine verte » en traduction de *cí*, bien que la porcelaine soit déjà associée à cette époque à la blancheur en occident [34].

Finlay résume parfaitement les conséquences de l'interprétation des définitions scientifiques pour parler de la porcelaine d'un point de vue plus historique en disant : « of course, the Western classification of stoneware and porcelain makes sense in terms of chemical and physical analysis in as much as there are genuine differences in mineral ingredients and material formation between the two ceramics. When the scientific categories are employed in historical narrative, however, they result in considerable confusion. »³ [38]. Néanmoins la nécessité d'une « zoologie » des céramiques, en particulier pour les collectionneurs et le marché de l'art qui souhaitent valoriser leurs objets, a sans doute conduit à l'appropriation de cette classification scientifique (voire influencé sa réalisation), même si elle n'est pas parfaitement adaptée.

3- *traduction* : Bien sûr les classifications occidentales en "stoneware" et porcelaine ont un sens du point de vue des analyses physico-chimiques car il y a de véritables différences dans les matières minérales et la formation de ces deux céramiques. Lorsque ces classes scientifiques sont employées dans un récit historique cependant, elles créent une confusion considérable.

3) *Classifications chinoises*

Les classifications occidentales des céramiques ne sont, bien-entendu, pas les seules existantes. Effectivement il existe également une classification chinoise traditionnelle des céramiques, qui diffère des occidentales. En effet si les classifications occidentales se fondent sur les propriétés physico-chimiques (composition, porosité, opacité...) des céramiques, en particulier de leur pâte, la classification traditionnelle chinoise est plus globale et se base plutôt sur le procédé de fabrication des céramiques et éventuellement leur aspect général. Contrairement aux classifications occidentales qui répartissent les céramiques en trois classes, celle-ci n'en contient que deux : **táo** et **cí** qui ont déjà été évoquées dans la partie précédente [31].

La première classe, **táo**, peut être traduite en français par poterie [39]. Même si, d'après le Grand Ricci, cette classe semble associée à de nombreux ordres de céramiques à travers des expressions comme « **táo cí** » (陶瓷), traduite en « poterie et porcelaine : céramique », « **táo qì** » (陶器), traduite en « objet d'argile ; poterie (de tous genres et qualité ; faïence, grès, porcelaine, etc.) ; produit en céramique » ou encore « **táo cí qì** » (陶磁器) traduite en « produits gréseux » [39], il s'avère qu'elle est plutôt associée aux céramiques cuites à des températures de petit feu, typiquement qualifiées de poteries à pâte tendre ou « earthenwares » dans les classifications occidentales [31].

Au contraire, la seconde classe, **cí**, dont la traduction proposée par le Grand Ricci est porcelaine comme discuté précédemment [35], est associée aux céramiques cuites à des températures de grand feu [31]. Ce genre de céramiques correspond typiquement aux deux classes de poterie à pâte dure ou aux « porcelains » et à la majorité des « stonewares » des classifications occidentales. Lion-Goldschmidt propose d'ailleurs de définir la porcelaine comme « une variété de grès, vitrifiée jusqu'à devenir translucide » [18], ce qui se rapproche de la classification chinoise à travers l'utilisation de **cí**.

Cette classification en deux classes au lieu de trois, qui met ensemble grès et porcelaines, permet d'éviter l'utilisation des terminologies complexes de proto-porcelaine, grès porcelaineux ou autres sous-ordres aux définitions souvent confuses [38]. Il serait cependant très réducteur de considérer que les classifications traditionnelles chinoises se limitent aux deux très larges classes **táo** et **cí**. En effet, comme pour les ordres et les sous-ordres des classifications occidentales, les céramiques sont ensuite catégorisées par famille en fonction de leur décor et la couleur de leur glaçure [40] ou bien de leur lieu de production [41] par exemple.

Pour simplifier le propos, les objets étudiés sont appelés « céramique » dans la suite de cette étude. Il est important de noter que ce mot est utilisé pour des raisons de clarté : en effet il serait plus exact (du point de vue des classifications) d'utiliser le mot « **cí** », ou « porcelaine » qui est sa traduction. Cependant il semble d'une part que l'utilisation régulière du pinyin **cí** dans le texte est peu lisible et d'autre part que les fortes connotations de blancheur associées à « porcelaine » en français rendrait l'occurrence de ce mot pour désigner des objets noirs et bruns déstabilisante pour le lecteur.

Chapitre I : Les céramiques noires et brunes en Chine

A – Céramiques noires et brunes Pré-Sòng

1) Céramiques chinoises primitives et oxyde de fer

La céramique est un art très ancien dont on retrouve des traces en Chine dès l'époque néolithique. La plus ancienne poterie trouvée en Chine est une jarre mise au jour dans la province du Jiāngxī datée du début du neuvième millénaire avant J.-C. [31]. Les objets de cette époque sont relativement simples, mais les artisans chinois développèrent progressivement des technologies plus avancées, comme le tour de potier ou des fours permettant une maîtrise de l'atmosphère de cuisson, qui permirent d'accroître très tôt la qualité de leur production et de leur ajouter une dimension esthétique.

Entre le milieu du cinquième et le troisième millénaire, les cultures de Yǎngsháo et de Lóngshān ont conçu un grand nombre de céramiques de diverses formes, avec des pâtes aux couleurs variées allant du gris-noir au rouge et des décors plus complexes, comme des impressions de tissus ou cordages à la surface ou des peintures de motifs géométriques rouges, bruns et noirs [19] (cf. Figure 1).



© Victoria and Albert Museum

Figure 1 : Jarre à anse de l'époque Yǎngsháo (Victoria and Albert Museum, C.39-1954)

Les différentes couleurs des pâtes et des peintures de ces céramiques sont, pour la plupart, dues à la présence de fer dans les matières premières utilisées [19]. En effet, le fer est le quatrième élément le plus répandu dans l'écorce terrestre après l'oxygène, le silicium et l'aluminium [42], il n'est donc pas surprenant qu'il soit présent en quantité significative dans des objets façonnés à partir de matières minérales d'origine naturelle.

Cet élément possède plusieurs formes oxydées stables et courantes : l'oxyde ferrique (Fe_2O_3) dont les formes minérales naturelles sont l'hématite qui est très commune et la maghémite qui l'est un peu moins ; l'oxyde ferreux (FeO) dont la forme minérale, la wustite, est relativement rare ; l'oxyde mixte (Fe_3O_4) dont la forme minérale est la magnétite qui est commune. Ces oxydes de fer ont des couleurs variées et cristallisent sous des atmosphères de cuissons différentes (plutôt oxydante pour les oxydes ferriques et plutôt réductrice pour l'oxyde ferreux). Il est ainsi possible pour les artisans de contrôler la couleur des pâtes de leurs céramiques du rouge au noir selon l'effet qu'ils recherchent en jouant simplement sur l'atmosphère de la cuisson et sans faire des mélanges complexes de matière première [19].

2) Développement des premières glaçures noires

Le fer est l'un des éléments colorants principaux des premières céramiques chinoises, mais il l'est en tant que constituant de la pâte. En effet, il faut attendre la dynastie Shāng (seconde moitié du deuxième millénaire avant J.-C.) pour que les premières glaçures se développent [19,31]. A cette époque, il s'agit de fines couches brillantes créées par application de cendres végétales à la surface des terres crues façonnées qui permettent une vitrification superficielle grâce aux températures élevées déjà atteintes à cette époque (autour de 1150-1200°C [19,31,43]). Ces cendres sont parfois mélangées à des argiles pour faciliter leur application sous forme d'une suspension liquide. Leur coloration était alors généralement accidentelle, due à des oxydes métalliques, souvent de fer, présents sous forme d'impureté. Les oxydes de fer peuvent alors, une fois qu'ils sont dissous dans la glaçure, générer des colorations vertes, bleutées, jaunes ou ambrées selon leur état d'oxydation, en plus des teintes rouges, brunes et noires de leurs formes minérales [31,43,44].

Bien que ces colorations sont le plus souvent involontaires, des glaçures très anciennes possèdent des compositions qui suggèrent que l'artisan a choisi minutieusement ses matières premières afin d'obtenir une couleur précise. C'est le cas des plus anciennes glaçures noires retrouvées en Chine qui ont été datées d'entre la fin de la dynastie Shāng et la dynastie des Zhōu occidentaux (1046 - 771 avant J.-C.). Elles ont été retrouvées à Yīngtán et Qīngjiāng (actuelle Zhāngshù), deux villes situées au sud du lac Póyáng dans la province du Jiāngxī. Leur composition, particulièrement riche en fer, potassium et pauvre en calcium par comparaison avec les glaçures contemporaines, suggère une sélection rigoureuse de matières premières minérales plus riches en fer [31,45].

Ces céramiques anciennes, même si elles constituent des exemples notables de glaçures noires, demeurent une production assez marginale au sein des céramiques de la Chine antique. En effet, même si la production de céramiques à glaçure noire perdure et des céramiques avec des glaçures brunâtres sont développées sous les Hàn, les glaçures feldspathiques colorées avec de nouvelles couleurs comme le vert proto-céladon ou des glaçures à fondants à base de plomb sont généralement préférées [19,46]. C'est seulement à partir du IV^e siècle, sous les dynasties du Nord et

du Sud puis la dynastie Suí, que les céramiques à glaçure noire commencent à être fabriquées en quantité relativement importante et forment un ensemble cohérent. Les principaux fours à l'origine de cette production sont ceux de Dégīng et Yúháng (Zhèjiāng) [45].

3) *Céramiques noires et brunes de la dynastie Táng*

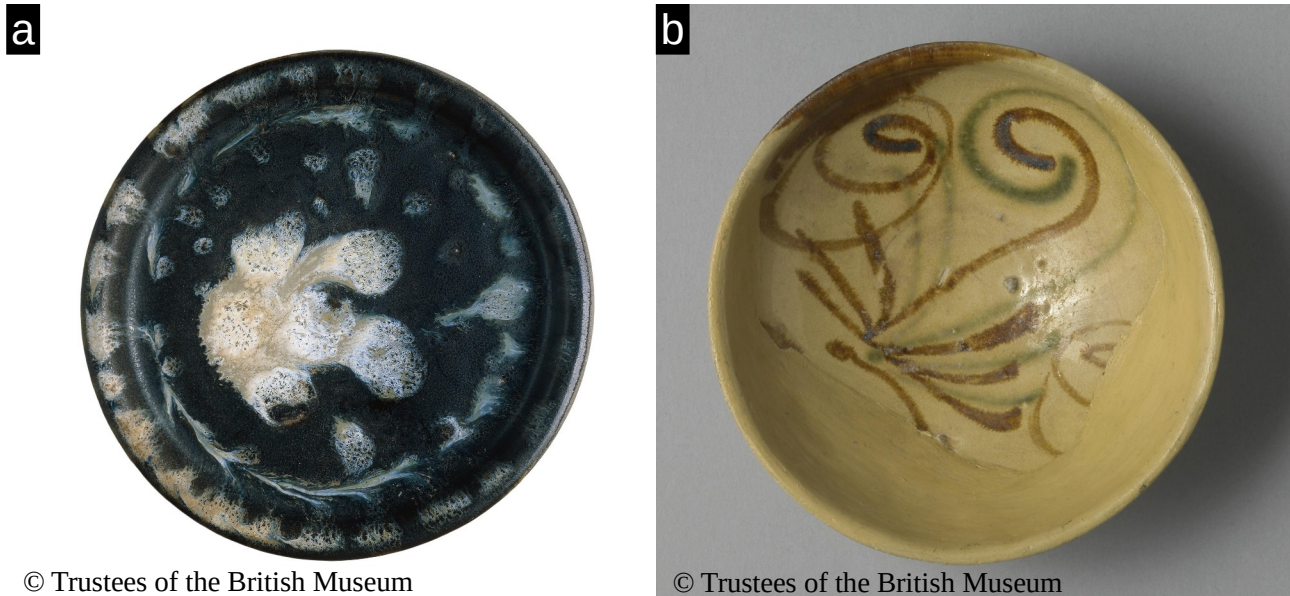
L'empire des Táng est un vaste empire ouvert sur le monde et une puissance commerciale importante grâce à son accès privilégié aux routes de la soie. Cette ouverture s'accompagne d'une expression culturelle qui qualifie souvent cette société de « cosmopolite » [46,47]. Cette dynastie a une image qualifiée par Hougron de « joyeuse et haute en couleurs » [46] qui se reflète dans leur production de céramique. Les céramiques aux fonctions funéraires, en particulier les personnages et animaux en céramique, sont très colorés et expressifs. De plus, le commerce avec le Moyen Orient favorise leur diffusion vers une nouvelle clientèle, ce qui augmente considérablement la demande, et ainsi la production de ce type d'objet en céramique [46].

Même si la cour des Táng préfère généralement réserver l'or et l'argent à sa vaisselle, elle utilise quotidiennement des céramiques fines cuites à haute température, comme la céramique blanche des fours de Xíng (Héběi) ou gris vert des fours de Yuè (Zhèjiāng) [46]. Les céramiques à glaçures noires ou brunes quant à elles sont destinées à une clientèle plus large et populaire. Elles ne sont plus produites majoritairement dans les fours du Zhèjiāng qui se spécialisent plutôt dans les glaçures vert-gris de type Yuè, mais dans de nombreux fours des provinces du Hénán, Shǎnxī, Shǎnxī et Shāndōng. Même si leur production dans les fours du Nord commence à partir du VI^e siècle, elle prospère de manière très importante au VIII^e et IX^e siècles [45]. Ces glaçures sont épaisses et le plus souvent noires ou brun foncé uni, cependant il arrive parfois que des motifs se développent sur certaines d'entre elles pendant leur cuisson. Ces motifs sont typiquement dus à la cristallisation de composés pendant le refroidissement et ont été valorisées par des dénominations spécifiques, comme « poussière de thé » (« tea dust » en anglais, « chàyè mò » en chinois) [45].

C'est également autour de cette période que des céramiques jouant avec un contraste entre des motifs sombres et clairs sont développées parallèlement à la production de vaisselle à glaçure unie. Certaines céramiques sont recouvertes avec des engobes blancs puis partiellement peintes avec motifs en glaçure foncée comme celles produites dans les fours de Huángbǎo (Shǎnxī) [45]. Ce contraste noir sur fond blanc s'est développé davantage pendant la période des cinq dynasties (période qui suit celle de la dynastie Táng) et est le plus souvent associé aux céramiques de type Cízhōu [48], d'abord produites dans les fours éponymes au Héběi, puis dont l'élaboration s'est entendue dans de nombreux fours du Hénán, du Shǎnxī, du Shǎnxī, du Shāndōng et de Níngxià suite à leur véritable succès sous les dynasties Sòng puis Yuán [31].

Le jeu de contraste inverse (c'est-à-dire blanc sur fond noir) a également été développé à partir de la deuxième moitié de la dynastie Táng en appliquant une glaçure plus claire au-dessus la glaçure foncée crue et préalablement séchée. Les plus célèbres exemples de ce procédé sont les glaçures noires à éclaboussures, généralement qualifiées en chinois de « huā yòu cí », littéralement « porcelaine florale glaçurée » [49] (cf. Figure 2-a). Ces glaçures sont produites principalement dans des fours du Hénán comme ceux de Lǚshān ou Huángdào [45,49], cependant des productions similaires ont été retrouvées dans d'autres fours comme ceux de Yàozhōu (Shǎnxī) [45,50] ou ceux de Róngxiàn (Guǎngxī) [45].

Enfin les céramiques à glaçure monochrome ne représentent qu'une partie de la production Táng, et des céramiques à glaçure polychrome richement colorée, en accord avec l'image qu'a laissée cette dynastie dans l'imaginaire collectif décrit précédemment, ont été fabriquées dans de nombreux fours à l'époque Táng. Dans ce type de décors, l'utilisation du brun est relativement fréquente. C'est le cas par exemple des céramiques trichromes produites dans les fours de Chángshā (Húnán), dont les décors mélangent des motifs verts et rouges faits à partir d'un colorant à base de cuivre et des motifs bruns faits à partir d'un colorant à base de fer [51] (cf. Figure 2-b).



© Trustees of the British Museum

© Trustees of the British Museum

Figure 2 : Assiette à glaçure noire éclaboussée (British Museum, 1967,1212.2) (a) ;

Bol à glaçure trichrome de Chángshā (British Musieum, 2007,6001.2688) (b)

B – Société et esthétique Sòng

La dynastie Sòng occupe une place tout à fait particulière dans l'historiographie de la Chine. En effet, d'après certains historiens comme le sinologue Peter Bol, il s'agit de la dynastie qui a rompu avec l'ordre impérial antérieur en place jusqu'alors et a servi de base pour établir un nouvel ordre impérial qui a atteint son apogée sous les dynasties Míng et Qīng [52]. Cette dynastie est aussi vue comme l'une des périodes les plus florissantes d'un point de vue artistique et intellectuel, comme l'écrit Dieter Kuhn [53], mais également économique [54,55]. Ces descriptions, sur lesquelles sont basées cette partie, dessinent un portrait global dynamique de la Chine des Sòng qui permet d'expliquer des évolutions sociétales générales qui ont eu des conséquences majeures sur le développement de l'art céramique à cette époque. Cependant, il est important de garder en mémoire que ce récit rend peu compte de la complexité de cette histoire.

1) De la dynastie Táng à la dynastie Sòng

La transition entre les dynasties Táng et Sòng est bien documentée du point de vue de l'histoire événementielle car il s'agit d'une période d'intenses changements géopolitiques, économiques, etc. C'est au cours de cette transition que des germes de modifications culturelles et politiques

profondes ont été plantés, modifications qui se sont manifestées sous la dynastie Sòng qui s'est bâtie avec succès sur ces nouvelles fondations.

La période pendant laquelle la dynastie Táng régna fut sans doute l'une des plus glorieuses de l'histoire chinoise. En effet, cet empire était très vaste et représentait la puissance politique, économique et militaire principale du continent asiatique. Elle était dirigée par un empereur assisté par une bureaucratie locale importante dont les membres étaient en grande partie issus de grands clans distingués par leurs exploits militaires. Ces clans étaient assimilés à l'empire afin de profiter de leur puissance et de maintenir une stabilité politique. Pour s'assurer de leur soutien, l'empereur leur accordait une importance politique majeure, avec des contrôles de territoires et des droits héréditaires garantissant leur prospérité durant plusieurs générations [47,52].

Cependant, afin de modérer leur pouvoir politique et de maintenir sa domination, la dynastie Táng dut imposer plusieurs règles, comme des mesures de restrictions géographiques, des réorganisations de provinces, la mise en place de milices ou la possibilité d'accéder à des postes de fonctionnaires par concours basés sur la connaissance des textes anciens, qui deviendront les examens impériaux appelés « kējǔ ». De plus, pour s'assurer que leur prestige était dépendant de l'empereur, une hiérarchie des clans en fonction de leur contribution au pouvoir central fut établie [47].

Malgré ces mesures préventives, l'extension du territoire contrôlé par les Táng obligea les empereurs à supprimer le système des milices, permettant à nouveau aux clans de posséder des armées pour défendre les frontières de l'empire. Cette autonomie leur offrit l'opportunité de rivaliser avec la domination impériale, entraînant une instabilité politique qui éclata avec la révolte d'Ān Lùshān entre 755 et 763, reconnue par les historiens comme point d'orgue dans le basculement de la dynastie [52]. Cette guerre civile a durablement affaibli la position de l'empereur et provoqué des difficultés économiques qui rendirent les soulèvements de population de plus en plus fréquents. Cette situation instable a duré jusqu'en mai 875, où une terrible famine touchant l'Est de la Chine provoqua une grande révolte menée par Huáng Cháo dont les conséquences conduisirent à la chute de la dynastie Táng en 907 et au soulèvement de nombreux généraux et gouverneurs militaires qui firent entrer l'empire dans la période de division dite des cinq dynasties et dix royaumes [56].

La période des cinq dynasties et dix royaumes s'étend de 907 à 960. Il s'agit d'une période d'instabilité politique pendant laquelle la Chine était divisée entre au Nord, un territoire assez vaste disputé par des généraux qui verra se succéder cinq dynasties (Liáng postérieurs, Táng postérieurs, Jìn postérieurs, Hàn postérieurs et Zhōu postérieurs), et au Sud plusieurs petits états cohabitant en relative stabilité. C'est également à cette période qu'émergea la puissante dynastie des Liáo d'ethnie khitan au Nord du territoire occupé par les cinq dynasties.

C'est dans ce contexte géopolitique agité que Zhào Kuāngyìn fut nommé au conseil de l'empereur des Zhōu postérieurs. Ses talents militaires lui permirent d'obtenir le titre de chef de l'armée royale, le plus haut rang militaire existant alors. En janvier 960, il fut chargé à ce titre de repousser une offensive de l'armée Liáo. C'est lors de cette campagne que l'armée chinoise le proclama empereur, titre qu'il prit officiellement sous le nom de Tàizǔ à son retour à Dàliáng le 3 février 960 [57]. Désormais à la tête de l'empire, son principal défi fut de trouver un moyen de faire survivre sa dynastie alors que les cinq précédentes s'étaient éteintes au bout de quelques années seulement. Identifiant la décentralisation du pouvoir central au profit des gouverneurs locaux

comme principale cause de la chute des dernières dynasties, il commença par limiter leur influence et leur possibilité de se révolter. Après avoir stabilisé la situation politique sur son territoire, il s'attela à réunifier l'empire en annexant un à un les royaumes du Sud. L'unification complète fut achevée par son frère Tàizōng, deuxième empereur de la dynastie avec la conquête du royaume des Hân du Nord [56].

La présentation de cette histoire événementielle synthétisée permet à la fois d'identifier les acteurs, en l'occurrence les élites, de la cour aux armées, des chefs de clans aux lettrés, susceptibles d'acquérir de la céramique de qualité, comme d'imaginer les conséquences des choix politiques, des événements ou des révoltes sur l'économie de la céramique.

2) *Transformations sociales sous les Sòng*

La recentralisation du pouvoir effectuée par les premiers empereurs Sòng s'est accompagnée d'une véritable transformation de l'élite de l'empire. Administrativement, les empereurs Tàizǔ (927-976) et Tàizōng (939-997) ont opté pour la construction d'un système de recrutement des fonctionnaires plus ouvert pour limiter au maximum le pouvoir politique des gouverneurs militaires, basé sur la généralisation des concours qui validaient la connaissance des textes traditionnels. Ce nouveau système a été perpétué et renforcé tout au long de la dynastie Sòng, constituant un véritable moteur pour soutenir les transformations sociétales profondes qui ont eu lieu à cette époque.

Ces concours étaient constitués de plusieurs échelons : le préfectoral qui donnait accès à des postes dans les administrations locales et le national, conférant le statut de « jìnshì », qui permettait d'accéder à des postes de hauts fonctionnaires. Mis en place dès l'époque Hân, cette méthode de recrutement était déjà utilisée par les Táng, sous lesquels les détenteurs de jìnshì représentaient un peu moins de 10 % des fonctionnaires [53,58]. Sous les Sòng, la proportion de fonctionnaires ayant le statut de jìnshì s'élevait à deux tiers [58], illustrant bien leur prise d'importance. Ces concours étaient ouverts à tous les hommes, quelle que soit leur classe sociale, au moins sur le principe. Ils étaient basés sur la connaissance des textes classiques confucéens, mais aussi appuyés sur les commentaires et interprétations des lettrés néo-confucéens. Ils étaient fortement soutenus par le pouvoir, comme l'illustre la demande par ordonnance gouvernementale de construction d'écoles dans chaque comté et préfecture en 1044, réitérée par l'empereur Huīzōng (1082-1135) en 1102 et le soutien des étudiants sélectionnés pour entrer à l'université publique, qu'ils soient issus de classes aisées ou plus populaires, comme l'explique le fonctionnaire et philosophe confucéen Cheng Yi (1033–1107) [53].

Ce système semble très ouvert au premier abord, puisque près de 57 % des lauréats n'avaient pas de filiation directe (père ou grand-père) avec d'autres diplômés [53]. Cependant, des études plus récentes considérant des cercles familiaux élargis (oncles ou cousins par exemple) montrent que le renouvellement demeurerait limité et que les postes restaient partagés entre un nombre assez restreint de cercles familiaux, même si bien plus important que celui des clans Táng [52]. Il faut également garder à l'esprit que les taux de réussite à ces concours étaient très faibles et que les lauréats ne représentaient qu'une minorité de la population.

Cependant, les opportunités de carrière et la notoriété offertes par leur réussite ont conduit à une attention accrue des élites locales à l'éducation confucéenne des communautés dans les villages et d'une population très imprégnée des croyances bouddhistes et taoïstes. Cet élan a été porté par le développement remarquable de l'imprimerie à cette époque [58]. Même si les femmes n'avaient pas le droit d'y participer, celles des milieux favorisés étaient éduquées de manière à pouvoir aider leurs fils dans l'apprentissage difficile des « Cinq Classiques » (Wǔjīng) et des « Quatre livres » (Sìshū) dès leur plus jeune âge [53]. Les familles des diplômés formaient de manière officielle une véritable élite cultivée [59], mais toutes personnes éduquées, titrés ou non lors des concours, constituaient un terreau idéal pour le développement de nouveaux systèmes de pensée, de mouvements éthiques et philosophiques qui débouchèrent sur des phénomènes de mode aux conséquences notables sur la culture matérielle, sur la céramique en particulier.

Le néo-confucianisme, brièvement mentionné au-dessus, est un mouvement essentiel de la culture médiévale chinoise. Ses prémices sont visibles dès la fin de la dynastie Táng dans les écrits de Hán Yù (768-824), philosophe, poète et politicien détenteurs de jìnshì [60]. C'est néanmoins sous les Sòng qu'il prendra toute son ampleur dans les années 1050 avec des figures éminentes que sont les frères Chéng Hào (1032-1085) et Chéng Yí (1033-1107) [52,60]. Il s'inscrit dans une démarche de réinterprétation des classiques confucéens, diffusés grâce au système des examens nationaux. Ce mouvement a également pris une dimension sociale, en créant notamment des écoles privées destinées à la préparation des examens ou en finançant des temples pour y diffuser ses idées et rituels, comme l'importance de la piété filiale ou le culte rendu aux défunts dans les familles [52]. Le bouddhisme et le taoïsme se sont également fortement développés sous les Sòng, notamment chez les classes moyennes et en milieu populaire, mais le confucianisme et le néo-confucianisme constituaient la base idéologique et politique de l'empire, définissant une identité et culture commune [60].

La population éduquée et les élites, imprégnées des nouvelles valeurs confucéennes, ont pris une importance notable et orienté leurs centres d'intérêt vers d'autres que ceux de l'aristocratie de l'époque Táng [59]. Le raffinement et l'harmonie étaient désormais davantage au centre de leurs considérations que les exploits martiaux [61]. Cette transformation contribua également à l'évolution de l'idéal masculin, autrefois reposant sur les capacités physiques désormais au second plan, vers un « gentilhomme » lettré (désigné en chinois par l'expression « jūnzǐ ») étudiant l'esthétique, la beauté ou la subtilité, collectionnant des objets précieux, méditant, faisant de l'introspection et rejetant l'ostentatoire [40,43]. Ce changement de paradigme a contribué au développement d'un goût prononcé pour la culture matérielle au sein de ces catégories de population. Il a également favorisé un fort développement des mouvements pacifiques, voire antimilitaristes au sein des élites [58], bien que l'époque pendant laquelle la dynastie Sòng a régné a connu plusieurs conflits armés.

Si ce nouvel idéal masculin ne concernait pas vraiment les hommes des classes sociales les plus basses qui représentaient une part non négligeable de la population, il ne restait néanmoins pas confiné à l'élite. En effet, cet idéal servait également de modèle aux fonctionnaires de rangs inférieurs, aux marchands aisés ou aux hommes appartenant aux classes moyennes, grâce à une élévation générale du niveau de vie de ces catégories sociales à cette époque, comme le décrit Stuart

Powell en expliquant que la dynastie Sòng est la « first period in Chinese history where a significant number of people were able to own things that were not necessary for survival »⁴ [40].

Cette augmentation générale du niveau de vie favorisa également le développement de nouvelles activités liées aux auberges, maisons de thé ou magasins spécialisés, rendant les villes plus dynamiques et favorisant les activités de loisirs [46,62,63]. Ce nouvel environnement était très favorable au développement et à la propagation des considérations esthétiques et philosophiques des lettrés aux classes marchandes et moyennes, faisant progressivement de cette époque « one of the most intellectually exciting and stimulating periods in the history of humankind. »⁵ [53].

3) *Situation géopolitique et économique sous les Sòng*

Pendant la première moitié de la dynastie Sòng, qualifiée de période des Sòng du Nord, les tensions avec la dynastie Liáo étaient vives, cristallisées côté chinois notamment par la détention des seize provinces du Nord de la Chine offertes aux Liáo par le premier empereur des Jìn postérieurs, et côté khitan, par l'annexion du royaume des Hàn du Nord. Les assauts entre les deux camps qui se succédèrent entre la fin du X^e et le début du XI^e siècle mirent en évidence l'équilibre entre les forces de ces deux puissances et débouchèrent sur le traité de paix de Chányuān en 1005 [58]. Ce traité avait à la fois une signification économique, car les Sòng devaient payer un important tribut aux Liáo, mais également symbolique car il formalisait les relations entre les deux puissances à travers leur reconnaissance mutuelle comme égale et leurs empereurs comme « frères » [58].

A la même période, une nouvelle puissance émergea au Nord-Est de l'empire Sòng : le royaume des Xià occidentaux ou Xīxià. D'origine tangout, ce royaume transforma drastiquement l'échiquier géopolitique de la région en transformant l'équilibre bilatéral Sòng-Liáo en un équilibre triangulaire (cf. Figure 3). Par peur d'une alliance entre les Liáo et Xīxià, les Sòng signèrent avec eux également un traité de paix en 1006 [58]. Cette paix fut ponctuellement troublée, par exemple entre 1038 et 1044 lorsque Xīxià déclara la guerre à l'empire Sòng et que l'empire Liáo en profita pour renégocier le traité de Chányuān, puis entre 1081 et 1088 lorsque les Sòng attaquèrent Xīxià. A chaque fois, le prolongement des conflits a été évité grâce au paiement de tributs souvent coûteux pour les Sòng.

Ces tensions fortes avec les états au Nord du territoire Sòng ont durablement limité les échanges commerciaux par les routes commerciales terrestres utilisées par les Táng, qui partaient de la capitale de l'époque Cháng'ān (actuelle Xī'ān, Shǎnxī) et longeaient la vallée de la rivière Wèi [47]. Cependant, le besoin de richesses (en particulier d'argent) pour payer les tributs ainsi que la hausse du niveau de vie général ont favorisé le développement de nouvelles routes commerciales maritimes vers le Japon, la Corée, l'Asie du Sud-Est, l'Inde et le Moyen-Orient [40,54,64,65]. Ce changement de mode de transport a durablement transformé les régions au Sud de la Chine comme le Fújiàn, auparavant considérées plutôt comme des provinces périphériques, qui comptaient désormais parmi les plus importantes [66]. En effet, leur accès à la mer et leurs réseaux fluviaux denses favorisèrent le transport de marchandises à l'échelle internationale, transformant par exemple le port de Quánzhōu en véritable centre d'échanges [65]. Le réseau de transports terrestres était également

4- *traduction* : « première période de l'histoire de Chine lors de laquelle un nombre significatif de personnes avaient les moyens de posséder des choses qui n'étaient pas nécessaires à leur survie ».

5- *traduction* : « l'une des périodes les plus intellectuellement excitantes et stimulantes dans l'histoire de l'humanité ».

développé en parallèle dans ces régions comme l'illustre la construction de nombreux ponts [66]. La navigation était en outre portée par les avancées technologiques majeures développées à cette époque comme l'utilisation systématique du compas magnétique, le développement de jonques de haute mer ou les grands investissements dans la construction de canaux [40,55,64,67].



Figure 3 : Carte des États d'Asie orientale pendant la période des Sòng du Nord (1111)

Un premier bouleversement géopolitique majeur causa la fin de la période des Sòng du Nord à la fin du XI^e siècle, lorsque des tensions inter-ethniques eurent lieu au sein de l'empire Liáo, en particulier avec les tribus d'ethnie Jürchen. Ces dernières s'unirent pour renverser le pouvoir sous la dynastie Jīn auto-proclamée en 1115. Voyant cette nouvelle puissance émergente comme une opportunité de vaincre les Liáo et de récupérer les seize préfectures du Nord, les Sòng s'allièrent aux Jīn en 1122. Cependant, devant les faiblesses exposées des armées chinoises, les Jīn décidèrent après leur victoire contre les Liáo en 1125 de conquérir l'empire des Sòng. Ils capturèrent les empereurs Huīzōng et Qīnzōng (1100-1161) et conquièrent le Nord de leur territoire dès 1127,

initiant ainsi la période dite des Sòng du Sud (cf. Figure 4) [58]. Pour échapper à l'invasion, la cour des Sòng et le nouvel empereur s'en allèrent vers le Sud jusqu'à ce qu'un enlisement du conflit soit atteint en 1132 qui déboucha sur un traité de paix difficilement négocié en 1141. Comme les traités précédents, il apporta une relative paix durable et la reconnaissance mutuelles de ces puissances. Il fut renégocié en 1161 en faveur des Sòng puis en 1208 en faveur des Jīn suite à de conflits [68]. Comme lors de la période précédente, les tensions entre ces deux puissances demeuraient fortes, limitant le commerce terrestre.



Figure 4 : Carte des États d'Asie orientale pendant la période des Sòng du Sud (1141)

Le second bouleversement géopolitique majeur qu'allait subir la région fut amorcé dès 1206 lorsqu'un jeune homme fut mis à la tête des tribus mongoles sous le nom Genghis Khan (v.1155-1227). Ce dernier se lança à la conquête des territoires Jīn dès 1211. Favorisant l'expansion de son territoire vers l'Ouest, il mit en pause cette campagne jusqu'en 1230, qui s'acheva en 1234 avec la mort du dernier empereur de la dynastie Jīn. Les Sòng partageaient désormais leur frontière Nord

avec l'empire mongol. Cependant ne mesurant pas la menace et se concentrant sur des problèmes intérieurs, la cour n'amorça pas de discussions diplomatiques comme avec les Liáo, Xīxià ou les Jīn quelques décennies plus tôt. Entre les campagnes à l'Ouest et les successions compliquées, les mongols n'attaquèrent pas immédiatement les Sòng. L'arrivée au pouvoir en 1260 de Khubilai (1215-1294), qui avait déjà en tête la conquête des territoires du Sud, signa une nouvelle étape dans l'extension du territoire mongol. Il commença la guerre contre les Sòng en 1268 et se proclama empereur de la dynastie des Yuán en 1271. Les Sòng résistèrent jusqu'en 1279 où le dernier empereur périt avec ceux qui l'accompagnaient lors d'une bataille navale [68].

Les situations géopolitiques tendues avec les puissances voisines Khitan, Tangout, Jürchen ou Mongoles, les bouleversements et les conflits réglés avec le paiement de lourds tributs décrits ci-dessus peuvent sembler défavorables pour le développement économique et commercial des Sòng. Paradoxalement, cette époque est souvent décrite comme une période de forte croissance [46,54], avec par exemple l'augmentation des productions agricoles, grâce en partie à l'introduction de céréales à meilleurs rendements comme le riz Champa [55] ou l'accroissement exponentiel de la production de métal permettant l'accès à des objets finis et outils à des prix relativement faibles [54,55].

Pour profiter de cet accroissement économique fort, les empereurs effectuèrent de nombreuses réformes tout au long de la dynastie. Du point de vue financier, une augmentation considérable des masses monétaires fut effectuée : il est par exemple estimé que seulement 150 millions de pièces de cuivre étaient en circulation en 820 contre 1,83 milliards en 1007 et 5 milliards en 1080, complétées par 800 millions de pièces de fer [69]. C'est également à cette époque que la monnaie papier fut introduite, constituant d'après Dieter Kuhn la « first viable paper currency system used in a national economy in world history »⁶ [69]. Du point de vue commercial, la « libéralisation » de l'économie et la redistribution des terres permettant à une partie des agriculteurs de tirer davantage de revenus entraînèrent une augmentation des marchés régionaux qui cristallisaient localement les échanges [66].

Ces transformations constituaient une véritable manne financière pour l'Empire, qui récupérait beaucoup d'argent grâce à ses monopoles, par exemple sur le thé ou le sel, lesquels alimentaient le trésor privé national en monnaie et métaux précieux [70], mais aussi avec les taxes commerciales qui représentaient par exemple 8,7 milliards de pièces en 1077. Pour en profiter pleinement, la fiscalité fut également significativement réformée, d'une part avec la conservation du système de taxe dit de double imposition (« dual tax system » en anglais), introduit par la dynastie Táng en 780 pour rationaliser le système en rassemblant les multiples taxes existantes, d'autre part avec la création de cinq classes de propriétaires taxées différemment en fonction de leur richesses [69].

Ainsi, les grandes villes ont vu leur population significativement augmenter, devenant des centres urbains concentrant entre 12 et 20 % de la population [54]. Certaines étaient très peuplées, notamment les capitales comme Kāifēng (Hénán) durant la période des Sòng du Nord, dont la population était estimée à plus de 1,5 millions d'habitants ou Hángzhōu (Zhèjiāng) durant la période des Sòng du Sud, dont la population dépassait le million d'habitant dès 1085 mais aussi d'autres qui abritaient plusieurs centaines de milliers d'habitants, par exemple Tánzhōu (actuelle

6- *traduction* : premier système viable de monnaie papier utilisé à l'échelle nationale dans l'histoire du monde.

Chángshā, Húnán) ou Quánzhōu (Fújiàn) [54,62,66]. Ces centres étaient particulièrement dynamiques, avec, comme évoqué précédemment, des magasins spécialisés, auberges ou autres commerces alimentés par les productions de fruits et légumes variés et des lieux de loisirs, comme des théâtres ouverts jour et nuit suite à la suppression des couvre-feux [46,55,62].

D'après Kent Deng, il est ainsi plausible de considérer que cette pression aux frontières ait véritablement constitué le moteur de ce développement : « The prime mover for the Song [Sòng] growth and development was the mounting geopolitical pressure from nomads who decided to exert their military supremacy to milk cash and luxuries from the Northern Song [Sòng] economy. »⁷ [54].

4) *Conséquences de ce contexte sur la céramique*

Même si l'empire a subi de violents bouleversements politiques entre la chute de la dynastie Táng et la fin de la dynastie Sòng, il semble que la céramique en général n'a pas été brutalement bousculée par ces changements. Il est important de préciser ici que les productions Liáo et surtout Jīn étaient très fortement influencées par celles des artisans Sòng, au point d'en être parfois quasiment indifférenciables [40]. Les fours du Nord de la Chine qui sont passés sous la domination Jīn ont notamment continué leurs productions sans changement brutal très significatif. C'est progressivement et uniquement vers la fin du règne de cette dynastie que la qualité de leurs productions a diminué et que leurs motifs sont devenus de plus en plus chargés [40]. Cela montre que des événements politiques majeurs de l'histoire dynastique ne rendent pas nécessairement compte des situations locales, qui sont très difficiles à documenter au regard de leur nombre considérable, de la diversité des échelles et de la difficulté d'accès aux sources. Pour ces raisons, même s'il est évident que des disparités régionales et locales existaient, cet aspect ne sera pas abordé dans ce travail, qui rend compte des tendances générales à l'échelle du territoire occupé par la dynastie Sòng.

D'un point de vue global, la céramique semble au contraire avoir profité tout au long de cette période des progrès continus portés à la fois par la croissance économique générale de l'empire des Sòng et par le sens esthétique pointu et les nouvelles considérations philosophiques des lettrés cultivés vivant à cette période. Tout ceci a conduit à un essor considérable de la production tant du point de vue de sa quantité que de sa qualité. C'est la raison pour laquelle cette époque est souvent considérée comme l'acmé de la production de céramique, voire des arts en général qui « atteignirent une perfection qui, aux yeux des Chinois, n'a jamais été égale. » d'après Beurdeley [19].

A cette période, l'accroissement significatif des volumes de production a été permis par la corrélation entre l'augmentation de la demande en céramique et les améliorations techniques et organisationnelles des méthodes de fabrication, permettant à la céramique de devenir une véritable industrie [40,43,54,63].

Du point de vue de la demande, la progression du niveau de vie général des habitants ainsi que l'installation de magasins de revente spécialisés et d'établissements de loisirs comme les maisons de

7- *traduction* : Le principal moteur de la croissance et du développement des Sòng a été la pression géopolitique croissante des nomades qui ont décidé d'exercer leur suprématie militaire pour soutirer de l'argent et des produits de luxe de l'économie des Sòng du Nord.

thé ou auberges décrits ci-dessus a contribué à une hausse de la demande en céramiques sur le marché intérieur [40,46,62]. De plus, la promotion extensive du commerce par voie maritime par l'Empire a permis d'étendre cette progression au-delà du marché intérieur, sur le marché international. En effet la céramique constituait un produit d'export idéal : ni périssable, ni affecté par l'humidité, ni trop fragile [63]. La demande en était particulièrement élevée, même comparée à d'autres produits exportés, comme l'attestent les nombreux tessons et objets retrouvés sur les sites archéologiques subaquatiques et dans les épaves datés de cette période [64,67,71,72]. Les marchands n'étaient pas les seuls acteurs de ces échanges internationaux : les moines bouddhistes, en particulier japonais, qui partaient en pèlerinage en Chine rapportaient également des céramiques dans leurs foyers d'origine [73]. Ces demandes variées ont conduit les ateliers à adapter leurs produits à la clientèle qu'ils souhaitaient viser [40].

Du point de vue du développement technologique, la production de céramiques s'est considérablement intensifiée pour répondre à cette demande colossale, se rapprochant de ce qu'on qualifie de production « de masse », tout en maintenant une qualité la meilleure possible.

Tout d'abord les sites de production étaient des complexes très étendus possédant plusieurs fours dont les vestiges archéologiques rendent partiellement compte [50]. Assez peu de textes anciens qui permettent d'appréhender le dynamisme des centres de production sous les Sòng sont parvenus aux historiens actuels. Le texte le plus important et complet est le *Táo jì* (陶记 ou *Notes sur la céramique*). Il s'agit du texte le plus ancien retrouvé à propos de l'artisanat de la céramique, qui décrit le fonctionnement du complexe de Jǐngdézhen. Sa rédaction, historiquement estimée entre les années 1323 et 1325 sous la dynastie Yuán, est néanmoins débattue, parfois considérée comme antérieure, sous la dynastie Sòng [31,74]. Ce texte de référence décrit précisément les dimensions impressionnantes de ce type d'installation : plusieurs centaines de fours autour d'un seul site (en l'occurrence « plus de trois cents » pour Jǐngdézhen), la construction de « maisons chauffées » pour la conservation des propriétés plastiques de l'argile et permettre une continuité de la production pendant les hivers [75]. Il met également en avant la spécialisation des ouvriers dédiés à la réalisation des différentes tâches bien définies (moulages des pâtes, application des glaçures, réalisations des décors, etc.), impliquées dans la fabrication des objets en céramique afin d'assurer une production de bonne qualité avec des volumes considérables [40,43,63,75].

Ensuite les fours étaient conçus pour accroître au maximum leur capacité et de nombreuses améliorations ont permis d'optimiser leur utilisation. On distingue principalement deux types de fours utilisés entre le Nord et le Sud de la Chine.

Au Nord, les fours utilisés sont dit « mántou » (馒头窑), ce qui signifie littéralement « four à pain ». Ces fours sont de forme hémisphérique en volume et semi-circulaire ou en « fer à cheval » au sol [31,63]. A partir de la dynastie Sòng, ces fours sont construits systématiquement avec une légère pente pour éviter que la rétraction des objets proches du foyer ne provoque leur inclinaison voire leur chute [63]. Le passage au charbon, qui permet le maintien des hautes températures de manière plus stable que le bois, est attesté par les vestiges archéologiques dans de nombreux sites datés de la période des Sòng du Nord [31,50,63]. Son utilisation comme combustible a nécessité de repenser la structure du four, en ajoutant notamment une fosse de récupération des cendres et un conduit de ventilation [31,50]. Le charbon a également permis la modification de forme générale des fours : ils sont devenus moins longs et plus larges afin de limiter les écarts de température entre

l'avant et l'arrière du four tout en élargissant les chambres pour augmenter leurs capacités [50,63]. Enfin pour optimiser la consommation de combustible et de matériaux de construction, certains fours avec un mur en commun ont été retrouvés, ce qui était cohérent avec la volonté de produire davantage de céramiques [63].

Au Sud, même si quelques fours mântou ont été retrouvés [31], les fours qui sont principalement excavés sont des fours dits « dragon » (龙窑) (cf. Figure 5-a). Ces fours allongés sont construits à flanc de colline, avec un foyer unique alimenté au bois à l'extrémité la plus en aval, ce qui permet au four d'agir également comme une cheminée géante et favorise l'évacuation des fumées [31,63]. Les dimensions de ces fours étaient colossales, par exemple le four de Lóngquán (Zhèjiāng) dépassait les 80 m de long et l'un des fours du complexe de Jiàn (Fújiàn) atteignait 135,6 m [31,63]. Ce dernier avait la capacité, d'après les estimations, de cuire en une seule cuisson 100000 pièces [63]. Plusieurs chambres successives sont reliées les unes aux autres par un couloir dont les formes ont évolué progressivement pour avoir toujours un meilleur contrôle de la flamme [63].



Figure 5 : Photographies du four dragon du site de Dàlùhòumén (Fújiàn) (a), d'un exemple de tesson collé à la casette de cuisson (b) et du dépotoir du four de Daluhoumen (c)

Ces progrès, du point de vue de la maçonnerie des fours, ont également été facilités par l'utilisation d'accessoires permettant un meilleur contrôle des cuissons et assurant la protection des objets. En particulier, le recours systématique à des casettes individuelles, appelées « xiá bō » (匣钵), permettait à la fois de protéger les objets des aléas de cuissons (comme le dépôt de cendres volantes sur les glaçures ou les chutes d'objets sur d'autres) tout optimisant la disposition des pièces dans les fours [19,63,75] (cf. Figure 5-b). Des témoins, permettant de mesurer la température en cours de cuisson ont également été retrouvés sur plusieurs sites et sont également mentionnés dans le Táo jì [63,75]. Il semble néanmoins que malgré tous ces progrès techniques, les accidents de cuisson restaient fréquents [19,41]. Ils sont estimés à « près de 50 % de la production » dans les fours dragon d'après Beurdeley par exemple, chiffre qui semble très élevé pour être considéré sans prudence. Les pièces ratées étaient détruites et jetées dans des dépotoirs à proximité des fours qui pouvaient atteindre des hauteurs allant jusqu'à 20 m [19,41] (cf. Figure 5-c).

5) Esthétique et art céramique Sòng

Cependant, plus qu'une industrie, la céramique a également bénéficié d'une position considérée dans la hiérarchie des arts décoratifs. Grâce à l'attention portée par les artisans à sa qualité, elle est allée jusqu'à devenir un véritable art s'attirant les faveurs impériales [43,76]. En effet la profonde transformation des mentalités des élites lettrées et de la cour a conduit à une évolution progressive de cet art et lui a donné une esthétique forte, caractéristique de son temps comme de sa philosophie [19,40,46]. En effet, les céramiques ne sont plus considérées seulement comme des objets utilitaires pour la vie de tous les jours, mais sont désormais conçues pour devenir des objets de contemplation à étudier pour en saisir la beauté [40].

Tout d'abord, une importance de premier plan était donnée à la sobriété des céramiques, par opposition aux décors plus chargés appréciés des ethnies « barbares » du Nord et perçus comme très ostentatoires par les lettrés Sòng, confortant leur impression de supériorité culturelle [40]. Cette dimension se traduisait parfaitement dans l'esthétique subtile et dépouillée des céramiques Sòng dont les décors et les formes étaient conçus pour être « understated », pour reprendre le mot exact de Powell [40], qui se traduirait littéralement par "sous-déclaré" que l'on rend traditionnellement avec sous-estimé, discret ou minimaliste. Cette sobriété s'accompagnait de la recherche d'une harmonie parfaite entre la couleur et texture de la glaçure et la forme de l'objet sur laquelle elle est apposée [40,61,77].

Les formes relativement simples, sans cassure brutale de leurs courbes, sont favorisées. Elles sont parfois habillées de quelques motifs ciselés, imprimés ou peints, souvent dérivés de la nature et représentés avec des traits simples et équilibrés [77], suivant le principe esthétique proposé par Sū Shì (1037-1101), lettré, poète et calligraphe, de favoriser l'intention (Yì) plutôt que l'aspect (Xíng) [78]. Celles-ci sont également parfois directement inspirées de la nature, comme les bouteilles en forme de courge et de calebasse très appréciées à cette époque [61].

Cependant, les formes développées par les artisans n'étaient pas seulement belles en soi, mais devaient posséder une beauté fonctionnelle, en accord avec l'usage des objets. Une telle propriété est parfaitement visible dans les oreillers produits par les fours de Cízhōu (Héběi) dont la forme s'accorde parfaitement avec les contours de la tête humaine [61] ou les bols à thé des fours de Jiàn (Fújiàn) dont la forme favorise la prise en main et de petites gorgées tout en rappelant celle des chapeaux traditionnels [45,78,79].

Les glaçures appliquées sur ces objets étaient formulées pour être spécialement épaisses et onctueuses [76,77]. Souvent monochromes dans les fours impériaux, leur couleur était également inspirée de la nature, comme le vert jade, bleu ciel ou encore blanc lune [61]. Les céramiques à décors ciselés étaient couvertes de glaçures semi-translucides pour faire apparaître le plus subtilement possible les motifs par contrastes colorés créés par différences d'épaisseur. Les céramiques produites dans les fours populaires étaient décorés de motifs un peu plus chargés, souvent des fleurs ou des oiseaux [61].

Des contrastes colorés et motifs étaient également « dessinés » par des accidents de cuisson recherchés par les potiers, comme les glaçures bleues à taches rouges et violettes produites par les

fours de Jūn (Hénán) ou les glaçure noires à coulures brunes et mouchetures argentées produites par les fours de Jiàn [61,78].

L'aspect tactile de la glaçure avait également une grande importance, avec par exemple la recherche d'effets de peau d'orange ou de craquelures [77]. Les craquelures en particulier étaient parfois rehaussées à l'aide de bains d'encre [80]. Ces effets tactiles, perçus habituellement par les autres cultures comme des défauts, étaient particulièrement appréciés par les Sòng car ils permettaient de créer des pièces exceptionnelles et uniques tout en mettant en valeur la sublimation du travail des artisans par la nature [61,80].



Figure 6 : Bouteille de type Rǔ (British Museum, PDF.61) (a) ;

Céramiques de type Jūn (Victoria and Albert Museum, C.845-1936, CIRC.141-1935 et C.844-1936) (b) ;

Bol à décor incisé de type Dìng (British Museum, PDF.154) (c) ;

Jarre à glaçure craquelée de type Guān (Victoria and Albert Museum, C.25-1935) (d)

Cette idée de sublimation par la nature qui se révèle uniquement lors de la cuisson avait une importance considérable pour les lettrés Sòng. Les décors ainsi créés ne possédaient que pour seule origine l'action de la nature, comme l'explique Ma dans son travail de mémoire en indiquant que les glaçures de Rǔ et de Jiàn sont « free of any artificial decoration except the glaze defects, which were considered as traces of nature and appreciated as visual representations of the aesthetic of naturalness. »⁸ [78]. Les artisans ont beaucoup joué avec leurs conditions de cuisson pour influencer au mieux l'apparition de ces « accidents », cependant ils n'étaient pas complètement contrôlés artificiellement, ils donnaient donc cet aspect caractéristique de "naturel sans artifice" (unadorned naturalness) [77,78].

Les principes esthétiques décrits ci-dessus sont parfaitement illustrés par les céramiques Sòng citées comme les cinq grandes catégories classiques par la majorité des auteurs : les Dìng, les Jūn, les Rǔ, les Guān et les Gē [31,41,43,46,80,81] (cf. Figure 6). Cette distinction comme « classique » est néanmoins discutée dans la littérature récente [82].

C – Céramiques noires et brunes Sòng

Si l'époque des Sòng est aujourd'hui considérée comme une des plus grandes époques de la production de la céramique par son raffinement, sa qualité et sa sobriété, il s'agit aussi sans doute de la période à laquelle les artisans chinois ont utilisé l'élément fer comme colorant de la manière la plus variée et recherchée possible. En effet, en faisant varier sa concentration dans la glaçure et sa nature chimique, ils développent une impressionnante gamme de couleurs variant du blanc ivoirin au noir profond, en passant par des bleus, des verts et des bruns aux teintes riches et variées. Comme l'explique Monique Crick : « Le perfectionnement progressif des fours et le contrôle de l'atmosphère des cuissons leur permettent d'obtenir toutes les gammes de couleurs offertes par l'oxyde de fer, l'oxyde colorant le plus abondant dans la croûte terrestre » [43].

Pendant cette période, les différents complexes de fours qui constellent le territoire des Sòng sont souvent célèbres pour un type de glaçure en particulier, par exemple les objets de type Yàozhōu avec leur décors incisés sous une glaçure verte olive ou les objets de type Jūn avec leur glaçure bleue à grosses taches rouges violacées. Malgré cette association d'un type d'objet à un complexe particulier, les fours continuent le plus souvent à produire plusieurs types de productions différentes [43].

1) Céramiques noires et brunes Sòng

La céramique à glaçure noire et brune constitue généralement une production populaire destinée à usage quotidien. Malgré ce public cible, elle n'en est pas moins très appréciée par les élites qui ont contribué au développement de certains objets d'une finesse remarquable par des fours qui ciblaient une clientèle beaucoup plus aisée [83].

En consultant différents catalogues de collection ou de vente [41,84–92], ainsi que des ouvrages sur la céramique Sòng en général [19,45,46,48,93–95], il est possible de faire ressortir trois

8- *traduction* : exempts de toute décoration artificielle excepté des défauts de la glaçure, qui étaient considérés comme des traces de la nature et appréciés comme des représentations visuelles de l'esthétique du naturel.

complexes dont ces couleurs de glaçure étaient la spécialité, ce qui se traduit par l'utilisation du nom des fours pour qualifier leurs productions (cf. Figure 7). Ces complexes sont ceux de Cízhōu (Héběi), Jízhōu (Jiāngxī) et Jiàn (Fújiàn). Néanmoins les glaçures noires et brunes étaient également produites dans de nombreux autres complexes voisins, certains spécialisés dans d'autres types de glaçures comme celui de Yàozhōu (Shǎnxī) célèbres pour ses céladons évoqués précédemment ou celui de Dìngzhōu (Héběi), célèbre pour les céramiques Dìng de couleur blanc ivoire.

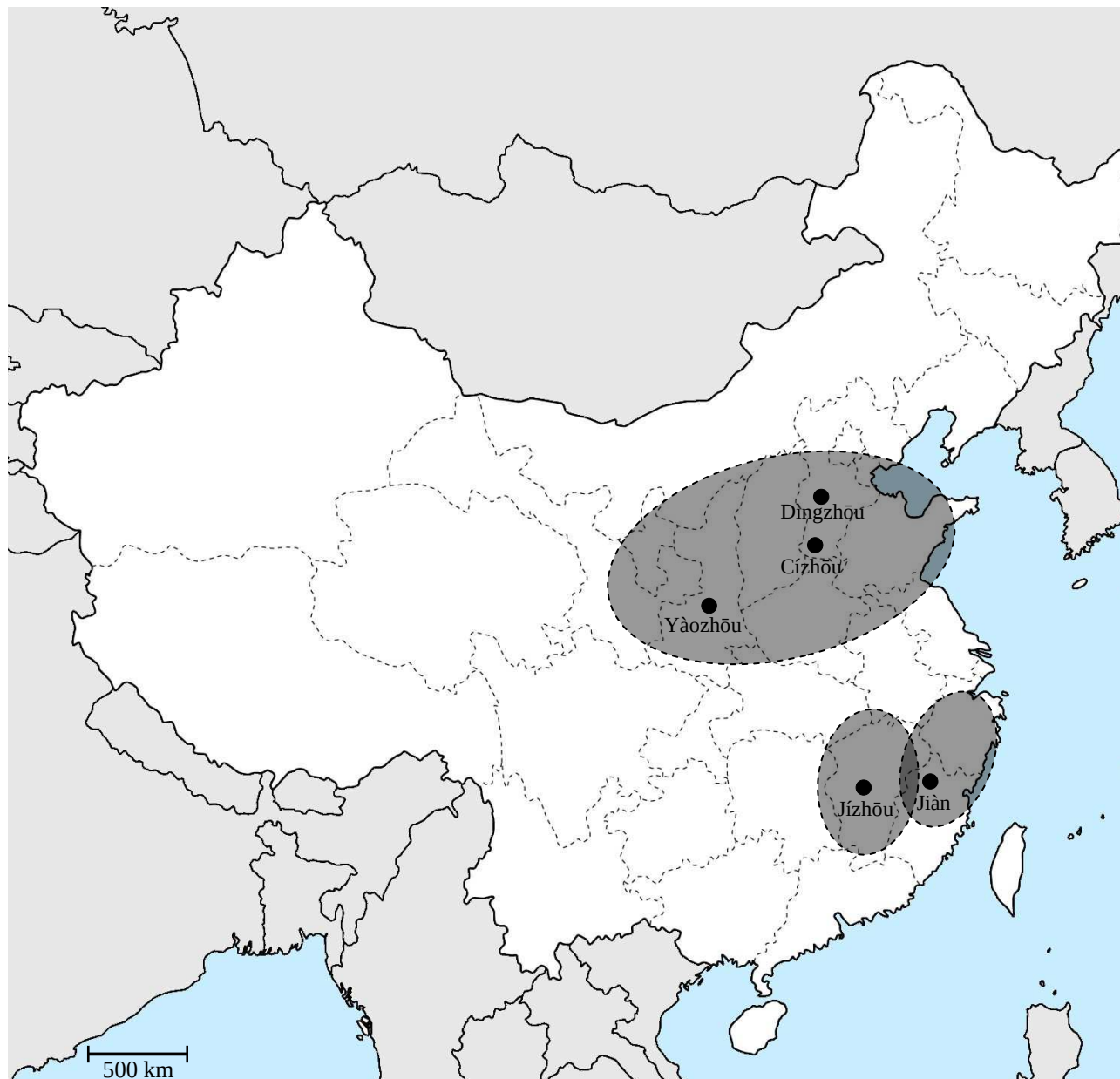


Figure 7 : Carte de la Chine indiquant l'emplacement des principales zones de production avec les complexes de fours les plus importants

Les céramiques de type Cízhōu constituent une classe extrêmement large de céramiques populaires à décors bruns et noirs sur fond blanc [31,48]. Elle est constituée d'objets de tous types (vases, verseuses, boîtes, oreillers) et a été également très appréciée par les marchands aisés [19]. Comme évoqué plus haut, même si elles sont associées aux fours de Cízhōu qui se trouvent dans la

province du Héběi, les céramiques de ce type étaient produites dans de nombreux fours du Nord de la Chine, dans les provinces du Hénán, Shǎnxī, Shānxī, Shāndōng et Níngxià [31,48].



Figure 8 : Jarre à décor en sgraffito (British Museum, 1968,0422.25) (a) ;

Céramique à décor peint (Musée Georges Labit, 70.5.3) (b)

Leurs décors sont souvent qualifiés de « sgraffito », technique dont le principe est de faire apparaître des motifs en les découpant dans la couche d'engobe blanc épais à la surface pour faire apparaître la pâte plus foncée ou un engobe brun ou noir qui la recouvre [19,43,48] (cf. Figure 8-a). Le tout était ensuite parfois recouvert d'une glaçure plombifère de petit feu transparente ou verte translucide [19,48]. Certains objets de ce type de productions étaient également peints avec des glaçures sombres ou de la peinture sans recourir au sgraffito [43] (cf. Figure 8-b). La famille des céramiques de type Cízhōu comprend également des monochromes bruns ou noirs, avec ou sans motifs, en imitation des glaçures produites dans les fours de Jiàn ou Dìngzhōu décrites ci-après [43]. Certaines pièces monochromes noires étaient également décorées par des lignes claires parallèles pour donner un effet côtelé [45], un engobe blanc au niveau de la lèvre des bols ou bouteilles pour contraster avec les glaçures sombres ou des motifs mouchetés bruns sur fond noir [43,48].

Les céramiques de type Jízhōu étaient produites dans la province du Jiāngxī et sont principalement des bols à thé à la pâte gris clair ou beige relativement grossière [45,48]. Leurs glaçures, au contraire de la pâte, sont relativement mates et ornées de décors subtils et variés : taches, médaillons, motifs végétaux ou animaux, souvent effectués en réserve, à l'aide de papiers découpés sur lesquels sont superposés des glaçures de différentes couleurs [19,45,63]. Parmi les décors typiques et actuellement les plus appréciés dans cette production [41], il faut mentionner l'empreinte d'une feuille d'arbre sur fond noir, parfois qualifiés de « temmoku de Jízhōu » ou « temmoku à feuille » [19,45,96].

Les céramiques de type Jiàn étaient produites dans les fours à proximité de la ville de Jiànyáng dans le Nord de la province du Fújiàn, d'où leur nom [31,48]. Essentiellement composées de bols à thé comme la production de Jízhōu, la production de Jiàn constitue sans doute le groupe le plus célèbre des glaçures sombres produites dans le Sud du territoire Sòng [48]. Elles ont un aspect plus rustique que les Jízhōu et sont caractérisées par une pâte très grossière, foncée, riche en fer et épaisse [43,48]. Bien que quelques formes distinctes de bols de Jiàn aient été retrouvées, la plus commune est le bol dont l'ouverture se ressert légèrement au niveau des lèvres, aujourd'hui appelé « yànkǒu wǎn », plus souvent désigné par les expressions « chá zhǎn » ou « chá ōu » dans la littérature de l'époque Sòng [45,48]. Leur dimension semble standardisée (davantage que celle des complexes cités au-dessus), avec des bols d'une hauteur de l'ordre de 6 à 8 cm et un diamètre d'environ 11 à 13 cm [45,48,83,92,97], ce qui semble cohérent avec la dynamique de production à grande échelle décrite précédemment et dont témoignent les vestiges archéologiques des fours dragons [31]. Les glaçures des bols Jiàn sont très épaisses et étaient appliquées sur les deux-tiers extérieurs du bol de telle sorte qu'elles produisaient avec la cuisson des gouttes ou bourrelets autour du pied brut non glaçuré, en accord avec l'esthétique « naturelle » décrite précédemment [31,43,48]. Elles sont noires avec des motifs abstraits et spontanés comme des coulures brunes, des reflets bleutés ou encore des mouchetures argentées ou de couleur rouille qui ont donné lieu à une nomenclature aussi poétique que variée qui est décrite en détail dans la suite [31,43,45]. Bien que plusieurs auteurs suggèrent que ces motifs sont dus, comme pour les glaçures de Jízhōu, à des superpositions de glaçures de composition différente [19,43,92], les études scientifiques suggèrent que ces motifs se créent spontanément par des mécanismes de séparation de phase [31,98,99]. L'utilisation d'une seule composition de glaçure est également cohérente avec les traditions des artisans actuels qui n'utilisent qu'un seul mélange fabriqué à l'aide d'une pierre rouge pour recouvrir leurs céramiques [100–102]. La seule exception à cette règle est le motif dit « plume de perdrix », pour lequel la disposition très régulière des taches claires et la différence de composition évidente mesurée suggère effectivement l'utilisation d'une seconde glaçure [31,45].

Malgré leur apparente rusticité, leur concordance parfaite avec les considérations esthétiques des lettrés Sòng ainsi que l'essor de la consommation du thé battu a fait de ces bols les instruments idéaux de cette activité [45,78,79], à tel point que la cour les utilisera volontiers et l'empereur Huīzōng lui-même vantera leurs mérites dans son *Dà Guān Chá Lùn* (ou traité du thé de l'ère Dagan) en 1107 [43,78,103]. Pour plus de détails sur la consommation du thé à l'époque Sòng, se référer à l'Annexe 1 : Introduction à la consommation du thé sous la dynastie Sòng page 194. Cette reconnaissance de la production de Jiàn jusqu'à la sphère impériale a inspiré de nombreux autres fours de tout le territoire à les imiter comme ceux de Cízhōu évoqués au-dessus, ou encore ceux de Yàozhōu, Jǐngdézhen (Jiāngxī) ou Tushan (Húnán) [43,45,50].

Comme indiqué précédemment, les fours de Cízhōu, Jízhōu et Jiàn étaient spécialisés et reconnus dans la production de céramiques à glaçure foncée mais ils n'étaient pas les seuls à produire de tels objets. De nombreux fours des provinces du Nord ont également produit massivement des glaçures brunes et noires en parallèle de leurs productions principales. Cette production, bien que secondaire, était franchement significative puisqu'elle représentait en termes de volume la seconde après les céladons vert olive dans les fours de Yàozhōu par exemple [104]. Aujourd'hui très appréciées des collectionneurs, elles étaient vraisemblablement plutôt destinées à un usage quotidien. Cependant certains fours produisant des céramiques plus « haut de gamme »,

comme le complexe impérial de Dìngzhōu, utilisaient également ce genre de glaçures [43,48]. Elles étaient appliquées sur des pâtes aussi fines que celles utilisées par ce complexe pour produire leurs célèbres glaçures blanches, bien que l'opacité de la glaçure la rendait distinguable uniquement au niveau de la lèvre des objets où elle était suffisamment fine pour être partiellement translucide [83]. Destinée à l'élite et à la cour impériale, cette production relativement restreinte est mentionnée pour la première fois en 1388 dans le *Gégǔ yàolùn* (ou *Critères essentiels d'antiquités*) de Cáo Zhāo et semble avoir eu énormément de succès puisque l'auteur y rapporte que ces pièces se vendaient à des prix supérieurs à ceux des Dìng blancs [43,83].

2) *Nomenclature des céramiques brunes et noires*

Comme évoqué précédemment, les céramiques noires et brunes constituent réellement une grande famille dont la diversité a contribué, dès l'époque Sòng au développement d'une nomenclature riche et dense pour qualifier les motifs qui les décoraient. Cette nomenclature a été reprise au fil des siècles avec des ré-interprétations et des traductions diverses par les collectionneurs et conservateurs de musées.

L'objectif de cette partie est de présenter cette nomenclature en confrontant les traductions anglaises et françaises avec les termes et expressions chinoises actuelles et anciennes quand ils sont accessibles. Elle se base sur l'examen des nomenclatures et descriptions d'objets ou groupes d'objets à partir de photographies issues des collections de différents musées [97,105–107], de catalogues de collection, vente ou exposition [41,84–92,108–110] et d'ouvrages plus généraux sur la céramique chinoise [19,43,46,76,83,94,95]. Les 525 objets ou groupes d'objets considérés dans cette analyse sont tous listés dans l'Annexe 2 : Étude de la nomenclature des glaçures noires et brunes dans la littérature spécialisée page 197.

Avant d'entrer dans les nomenclatures spécifiques aux différents types de glaçure, il est important de discuter le terme « *tenmoku* » (parfois orthographié « *temmoku* »). Il est très utilisé pour qualifier les glaçures noires et brunes chinoises dans la littérature occidentale. Il s'agit de la transcription du mot japonais « *天目* » utilisé pour qualifier de manière générique les productions chinoises à glaçure foncée au Japon [92]. La première occurrence de ce mot a été datée d'un rapport écrit en 1335 par le moine Onkei Soyu [111]. Ce qualificatif est en réalité simplement de la translittération japonaise du nom chinois de la montagne *Tiānmù*, montagne sur laquelle se trouvait de nombreux monastères Chán où les moines japonais allaient en pèlerinage. Le thé était quotidiennement consommé dans ces monastères à l'intérieur de bols produits notamment par les fours de Jiàn qui ont été importés au Japon et y ont été très appréciés [73,92,111]. Même si *tenmoku* semble se référer le plus souvent aux productions de Jiàn [95,105,111], il est également parfois utilisé pour qualifier d'autres productions, comme certaines productions des fours du Nord qualifiées de « *temmoku du Hénán* » ou avec des glaçures de « *type temmoku* » [76,95] ou encore les « *temmoku à feuille* » de *Jízhōu* évoqués précédemment [19,41,45,91,96].

Au vu de leurs décors, les productions à glaçure brune et noire Sòng peuvent être réparties en trois grandes classes : les monochromes, qui ne possèdent pas de motifs spécifiques à leur surface, celles qui sont ornées de motifs abstraits (mouchetures, taches, lignes, coulures...) et celles qui possèdent des décors figuratifs (motifs floraux au animaux principalement).

* *Glaçures monochromes*

Les glaçures monochromes constituent la première grande classe de glaçures noires ou brunes produites sous la dynastie Sòng. Leur aspect varie principalement selon trois paramètres : leur opacité, leur couleur et leur brillance.

Les glaçures unies translucides peuvent être regroupées sous deux couleurs principales, brun clair et brun foncé. La couleur des glaçures brun clair est parfois qualifiée de « ambre » [97], « brun doré » ou encore « céladon doré » [89], et celles des brun foncé de « marron olive foncé » [92] ou « céladon oxydé » [106]. Recouvrant le plus souvent la totalité des objets, elles laissent parfois apparaître un engobe blanc au niveau des lèvres des bols, comme c'est le cas sur deux objets de cette catégorie [85,105]. Elles étaient volontiers utilisées sur des céramiques à décors incisés pour faire ressortir leurs reliefs, mais elles pouvaient être également appliquées ponctuellement pour décorer des objets d'autres couleurs, comme sur la gourde Liáo des collections du Victoria and Albert Museum [97]. Ces glaçures semblent avoir été produites dans de nombreuses provinces (Sìchuān, Zhèjiāng, Héběi, Shǎnxī, Fújiàn...) sur toute la période entre les dynasties Táng et Yuán.

Les glaçures unies opaques peuvent être divisées en deux groupes selon la brillance de leur glaçure, lesquels peuvent ensuite être répartis en différentes catégories selon leur couleur.

Dans le groupe des glaçures brillantes, onze objets sélectionnés possèdent des défauts de cuisson ou un aspect granuleux, illustrant les nombreuses imperfections pouvant être induites par la cuisson décrites par quelques auteurs [19,41]. Pour ceux qui ne présentent pas de tels défauts, deux couleurs reviennent de manière récurrente : un brun assez caractéristique pour quarante-cinq objets et un noir (ou brun très foncé) pour soixante-deux objets.

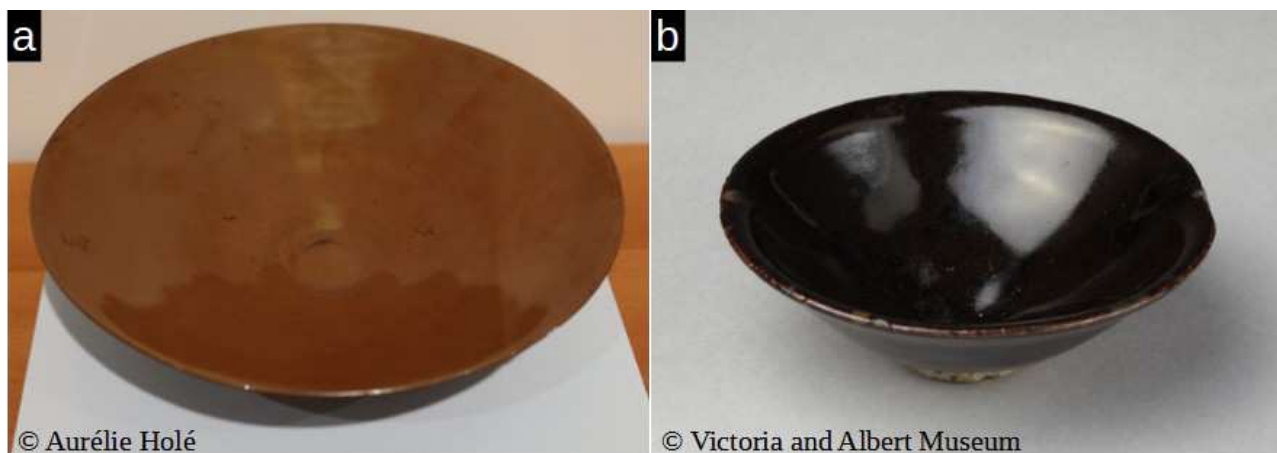


Figure 9 : Coupe à glaçure monochrome brun « sauce » (Musée Guimet, MA4285 ou MA4288) (a) ; Bol à glaçure monochrome noire (Victoria and Albert Museum, C.39-1965) (b)

Les monochromes bruns ont une couleur tout à fait particulière et un aspect brillant très marqué souvent décrit comme un lustre (cf. Figure 9-a). Leur couleur est désignée de nombreuses manières différentes, ce qui entraîne des difficultés à la qualifier de manière simple. Le type d'expression qui revient le plus souvent (vingt-quatre descriptions sur quarante-cinq) est glaçure « rousse » ou « rouille » (« russet » ou « rust brown » en anglais). Sept descriptions évoquent un « brun-rouge » (« reddish-brown » ou « red-brown » en anglais). Une autre dénomination assez commune (dix descriptions) utilisée pour cette couleur est « kaki », en référence au fruit (« persimmon » en

anglais). Ce fruit est aussi utilisé pour décrire cette couleur en chinois, à travers l'expression « shì hóng yòu » qui signifie littéralement « glaçure rouge kaki ». La couleur de la sauce soja est également évoquée dans deux descriptions [43,110]. Il est assez surprenant que ce qualificatif ne soit pas rencontré plus régulièrement dans ces ouvrages, puisque l'expression « jiàng yòu » qui signifie « glaçure sauce » est courante en chinois. Il s'agit également de la dénomination la plus utilisée dans la littérature scientifique [104,112]. Plusieurs expressions sont également plus rarement utilisées, comme « brun-pourpre » ou « brun-aubergine » qui semblent être réservées à des productions des fours de Dìng légèrement plus foncées que les brun « sauce » [43,97]. L'équivalent chinois de ces expressions est « zǐ dīng », littéralement « pourpre de Dìng ». L'expression « céladon doré », comme pour quelques glaçures translucides est parfois utilisée pour les glaçures opaques [89]. Ces glaçures sont également parfois simplement désignées comme des glaçures brunes ou glaçures au fer. Dans la suite de cette étude, cette couleur brune typique sera qualifiée brun « sauce ».

Ces monochromes bruns « sauce » semblent avoir été produits majoritairement par les fours du Nord de la Chine en production secondaire, notamment ceux du Héběi et Shǎnxī. Deux objets sont néanmoins indiqués comme provenant de la région de Gànzhōu (Jiāngxī) et un des fours de Jiàn. De plus, les deux objets dont la glaçure est qualifiée de céladon doré proviennent des fours de Lóngquán (Zhèjiāng) [89], ce qui suggère qu'il s'agit peut-être d'une dénomination spécifique à cette production. Ils sont tous datés de la période des Sòng du Nord ou Jīn, à l'exception des productions du Jiāngxī et des fours de Lóngquán qui sont plus tardives (Sòng du Sud ou Yuán).

La plupart des glaçures monochromes noires (cf. Figure 9-b) sont, quant à elles, le plus souvent qualifiées de « noires », « brunes » ou « brun foncé » (quarante-six descriptions sur soixante-deux). Plusieurs adjectifs commentant leur brillance (typiquement « lustrous » ou « glossy ») sont utilisés pour accompagner les descriptions des couleurs. Pour certaines (dix), les descriptions suggèrent la présence de motifs sur la glaçure, qui ne sont pas visibles sur les photographies qui ont servi de base à cette étude, d'où leur classement parmi les glaçures unies. Les glaçures monochromes noires semblent avoir été produites à travers toute la Chine entre les dynasties Táng et Míng. Ces glaçures sont enfin souvent mises en contraste avec des engobes ou glaçures blanches appliquées sur les bordures ou à l'intérieur des objets (dix-neuf sur les soixante-deux). Ce procédé est beaucoup plus rarement utilisé sur les monochromes brun « sauce », pour lesquels seul un bol possède des lèvres blanches.

La dernière catégorie de glaçures unies est composée des glaçures mates. Leur couleur se situe le plus souvent entre le brun foncé et le noir. Comme pour les glaçures brillantes noires, elles sont le plus souvent qualifiées de « noires » ou « brun foncé » (dix-sept descriptions sur trente-quatre). L'expression « brun chocolat » est également utilisée pour décrire deux objets des collections du Victoria and Albert Museum [97], qui n'est associée à aucune expression chinoise. L'expression « poussière de thé » (« tea dust » en anglais, « cháyè mò » en chinois) est également occasionnellement utilisée (dans quatre descriptions). Une telle expression a également été relevée dans deux descriptions d'objets classés avec une glaçure brillante [89,92], sans doute à cause de la difficulté d'estimer ce paramètre à partir de photographies. Ce nom est vraisemblablement lié à des glaçures brun foncé qui possèdent de nombreux points verdâtres répartis de manière homogène sur toute la glaçure, lui donnant un aspect uni mais légèrement hétérogène. Mowry propose également comme équivalent « golden brown » ou « greenish brown » pour ce type de glaçures [92]. Comme

les glaçures noires brillantes, elles semblent avoir été produites partout en Chine de la dynastie Táng à la dynastie Míng.

* *Glaçures à décors abstraits*

Les glaçures brunes et noires sont souvent décorées de motifs abstraits, le plus souvent clairs pour jouer avec les possibilités de contraste avec le fond sombre. Ces motifs prennent la forme de coulures, mouchetures ou taches plus larges. Ils sont parfois provoqués volontairement par les artisans avec l'aide de glaçures d'une composition différente de celle du fond, mais peuvent aussi se former spontanément au cours de la cuisson. Ces derniers étaient très appréciés car en accord parfait avec les principes esthétiques du « naturel sans artifice » de l'époque.

Les glaçures à coulures se retrouvent exclusivement sur des bols ou tessons de bols. Ils semblent avoir été fabriqués en très grande majorité dans les fours du Fújiàn (soixante-cinq des soixante-quinze objets identifiés comme tels), pour la plupart dans les fours Jiàn (ou associés comme le four de Shuǐjǐ) ou pour quelques uns dans ceux de Cháyáng. Pour les autres bols dont une provenance est indiquée, quatre sont supposés venir du Nord de la Chine et trois potentiellement du Jiāngxī. Ils ont été principalement produits pendant la période Sòng ou plus précisément Sòng du Sud, avec pour six objets un doute entre Sòng du Sud et Yuán [106] et pour deux une datation estimée sous la dynastie Jīn [92,107]. Les coulures sont le plus souvent de couleur brun « sauce », tirant parfois sur le brun-argenté voire l'argenté sur fond noir, mais deux rares échantillons possèdent des coulures cramoisies sur un fond brun « sauce » [106]. Elles peuvent avoir des aspects assez variables, parfois plutôt proches d'un dégradé, parfois de petites gouttelettes séparées les unes des autres (cf. Figure 10), tous les intermédiaires imaginables étant possibles. Elles apparaissent vraisemblablement de manière spontanée à la surface au cours du refroidissement [31,98,99].



Figure 10 : Bol à glaçure « fourrure de lièvre » (Musée Georges Labit, 71-8-3) (a) ;

Bol à glaçure « fourrure de lièvre » (British Museum, 1947,0712.142) (b)

Ces glaçures peuvent être visuellement divisées en deux catégories selon que les coulures sont présentes sur la totalité (ou majorité) de la surface du bol ou juste autour des lèvres. Cette différence ne semble cependant pas significative pour les conservateurs et historiens de l'art, qui utilisent volontiers les mêmes dénominations pour ces deux catégories. Elles sont le plus souvent qualifiées

de « fourrures de lièvre » ou « hare's fur » en anglais (dans trente-huit descriptions en tout, dont trente sur cinquante-six avec des coulures sur tout le long de la glaçure et huit sur seize avec des coulures uniquement sur les lèvres). Les autres sont désignées comme « striées » (« streaked » en anglais) ou irisées (« iridescent markings » en anglais), ou comme glaçure brune ou riche en fer sans plus de précision. L'expression équivalente « tùháo » (qui signifie littéralement poils de lapin) est utilisée en Chine, vraisemblablement depuis l'époque Sòng puisqu'elle se retrouve dans plusieurs traités ou poèmes anciens [79,103,113]. Au Japon, ces productions sont qualifiées de « nogime temmoku » [90].

Un bol avec ce type de glaçure présente des traces de pigment doré, suggérant que des décors sans doute plus figuratifs pouvaient être ajoutés à leur surface [106]. De plus, deux imitations des effets de coulures avec des feuilles métalliques (argent ou or) ont été également cataloguées, illustrant l'appréciation de ce genre de motifs [85,86].

Les glaçures à mouchetures constituent le deuxième groupe de glaçures à décors abstraits. Même si elles sont principalement appliquées sur des bols comme les glaçures à coulures (trente-quatre bols sur quarante-deux objets), elles sont parfois présentes sur d'autres types d'objets, comme des jarres ou des plats. La morphologie des mouchetures peut être divisée en deux catégories, des petites mouchetures aux bordures un peu irrégulières et des mouchetures plus larges et de forme globulaire (cf. Figure 11). La couleur des petites mouchetures varie selon les objets entre du brun de couleur un peu plus rouille que le brun « sauce », et de l'argenté. Ces motifs semblent avoir été produits dans la plupart des provinces de la Chine (Héběi, Hénán, Fújiàn, Shānxī...) principalement sous les dynasties Sòng et Jīn. Une production spécifique de pots à thé en céramique avec des couvercles en ivoire présente également des petites mouchetures réparties de manière plus irrégulière et une couleur brun-vert. Cette production semble plus tardive, datée d'entre les périodes Sòng du Sud et Míng [106]. Les mouchetures globulaires semblent quant à elles principalement produites dans la province du Fújiàn (dix objets sur douze identifiés dans cette catégorie), plus particulièrement par les fours de Jiàn. Les objets présentent le plus souvent des mouchetures argentées sur fond noir. Quelques pièces ont, en plus des mouchetures, des reflets bleutés et sont parmi les plus rares et estimées aujourd'hui [111].

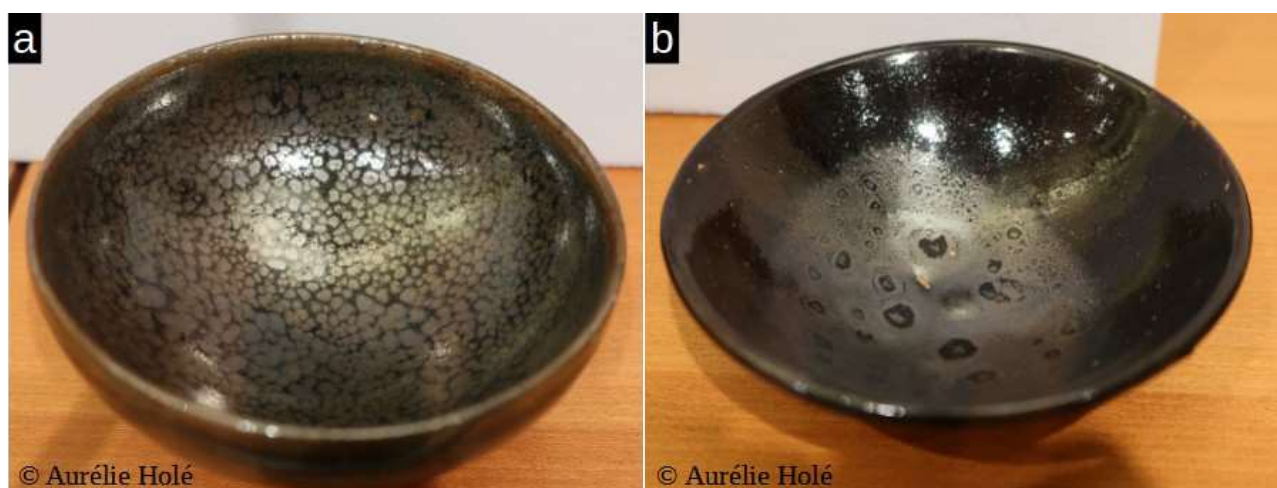


Figure 11 : Bol à glaçure « gouttes d'huile » (Musée Guimet, MA4133) (a) ;
Bol à glaçure « gouttes d'huile » (Musée Guimet, MA4141) (b)

A l'exception des bols à reflets bleutés qui sont le plus souvent désignés avec l'expression japonaise « yohen temmoku » qui signifie littéralement « temmoku transformé par la flamme » [111] et dont l'expression chinoise associée « yào biàn » a le même sens que l'expression japonaise, les bols à mouchetures semblent tous être qualifiés de « gouttes ou taches d'huile » (« oil spot » en anglais) par les conservateurs et historiens de l'art occidentaux et « yuteki temmoku » en japonais (vingt objets sur quarante deux). Ceux qui possèdent des mouchetures brunes sont quelquefois dénommés « taches de rouille » (ou « rusty oil spot » en anglais). Les descriptions qui n'utilisent pas ces expressions sont beaucoup moins précises, le plus souvent « couverture noire ou brune » en français et « iron glaze » en anglais. L'équivalent chinois « yóu dī » de l'expression « goutte d'huile » est volontiers utilisé pour identifier les glaçures à mouchetures mais il n'est pas le seul. En effet, l'expression « yǔdiǎn » par exemple, qui signifie « goutte de pluie » est également souvent utilisée [114]. Il semble que « yǔdiǎn » est employée plutôt pour qualifier les glaçures à petites mouchetures argentées, alors que « yóu dī » semble désigner tout les types de mouchetures.

Contrairement aux glaçures à coulures et à mouchetures présentées au-dessus dont les motifs se forment sans doute de manière spontanée à partir d'une unique glaçure au cours de la cuisson, les autres motifs abstraits sont probablement provoqués en appliquant une glaçure ou un engobe plus clair sur la glaçure de fond plus foncée.

C'est le cas des glaçures unies noires à décors côtelés, dont la régularité et la clarté des lignes qui ornent la glaçure ne laissent aucun doute quant à l'utilisation de deux glaçures de composition différente par l'artisan. Ces productions sont exclusivement associées aux fours du Nord de la Chine, en particulier ceux du Héběi, Hénán et Shāndōng. Souvent qualifiés de typiques de Cízhōu, ces décors ont été produits dans de nombreux autres fours comme ceux de Zībó (Shāndōng) ou Péngchéng (Héběi) [85,106] sous les dynasties Sòng et Jīn. Ces glaçures sont parfois qualifiées de « temmoku » [76].

Les glaçures éclaboussées (« splashed ware » en anglais, « huā yòu cí » en chinois) évoquées précédemment comme glaçures sombres appréciées sous la dynastie Táng ont également été produites au cours de la dynastie Sòng, peut-être même Yuán (cf. Figure 2-a, page 26) [106]. Leur production s'est déplacée entre ces dynasties des fours de Lǚshān ou Huángdào (Hénán) vers ceux du Jiāngxī, notamment Jízhōu. Comme pour les glaçures noires côtelées, ces décors étaient produits avec deux glaçures de composition différente.

Les taches larges constituent le dernier groupe de décors abstraits utilisés pour parer les glaçures noires et brunes. Répartis en deux couleurs, beiges ou brun « sauce », ces groupes peuvent être divisés en catégories selon la répartition régulière ou aléatoire de leurs décors et la définition des bordures des taches.

Les taches beiges ont le plus souvent une couleur peu uniforme, tirant par endroits sur le jaune. Elles sont généralement relativement larges (centimétriques), de forme ovoïde et réparties de manière aléatoire sur le fond sombre. Les taches sont de tailles globalement comparables sur une même glaçure et leur bordures sont parfois irrégulières, parfois très nettes leur donnant un aspect plus globulaire (cf. Figure 12-a et b). Quel que soit l'aspect de leurs bordures, ces décors généralement qualifiés d'« écaille de tortue » ou « tortoise shell » en anglais (onze descriptions sur seize), sont également parfois simplement appelés « éclaboussures ». Ces motifs sont principalement utilisés pour décorer des bols, parfois comme décor principal à l'intérieur et

l'extérieur, mais également comme décor secondaire (voir les objets du groupe « paper-cut » par exemple).

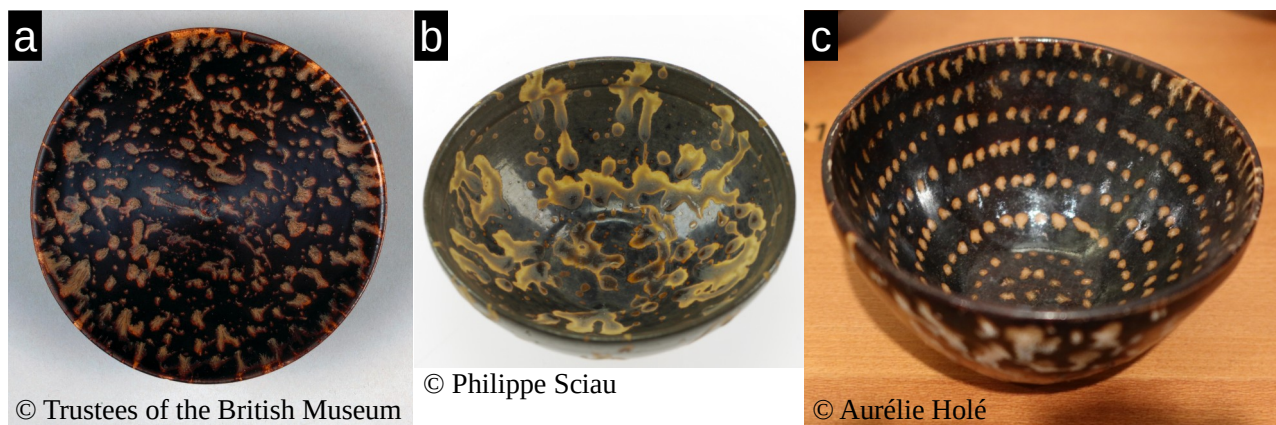


Figure 12 : Bol à glaçure « écaille de tortue » (British Museum, PDF.305) (a) ;

Bol à glaçure « écaille de tortue » (Abbaye de Belleperche, AT-2010-67-317) (b) ;

Bol à glaçure « écaille de tortue » (Musée Guimet, MA4276) (c)

Lorsque le nombre de taches est très élevé, elles se transforment en coulures larges et le décor ne peut plus être qualifié d'« écaille de tortue » d'après Mary Tregear qui explique à propos d'un bol de ce type : « Strictly speaking, this is not a tortoiseshell glaze but a very rich use of the same coloured glazes »⁹ [95]. Ces glaçures pouvaient également être appliquées de manière à former des motifs géométriques, comme l'illustre un vase qui possède des motifs typiques d'objets décorés avec des laques [41]. Ces décors sont caractéristiques des fours du Jiāngxī, en particulier Jízhōu, mais aussi Yǒnghé ou Nánkāng par exemple.

Deux bols produits par les fours de Jízhōu présentent en leur intérieur des petites taches beiges disposées en cercles concentriques et un décor de type « écaille de tortue » à l'extérieur cf. Figure 12-c) [86,107]. Ce motif de cercles concentriques qui semble assez rare est qualifié de « tache de chevreuil » par l'une des source (« deer spot » en anglais) [86] et d'« écaille de tortue » par l'autre [107].

Contrairement aux taches beiges qui sont associées le plus souvent aux fours du Jiāngxī, les bols décorés avec des taches brun « sauce » proviennent le plus souvent des fours du Nord de la Chine, en particulier du Hénán [105] et du Héběi [86,87]. Ces productions sont parfois qualifiées de typique de Cízōu (dix-sept descriptions sur cinquante-sept) et principalement datées des dynasties Sòng et Jīn, sauf quatre qui sont potentiellement de la période Yuán. Ces décors sont appliqués sur tous types d'objets (bols, vases, jarres, coussins...) et sont parfois mis en contraste avec des applications d'engobes blancs, notamment sur les lèvres des bols (six exemples dans ce groupe).

9- *traduction* : Ce n'est pas une « écaille de tortue » à proprement parler, mais une utilisation très poussée de glaçures de la même couleur.

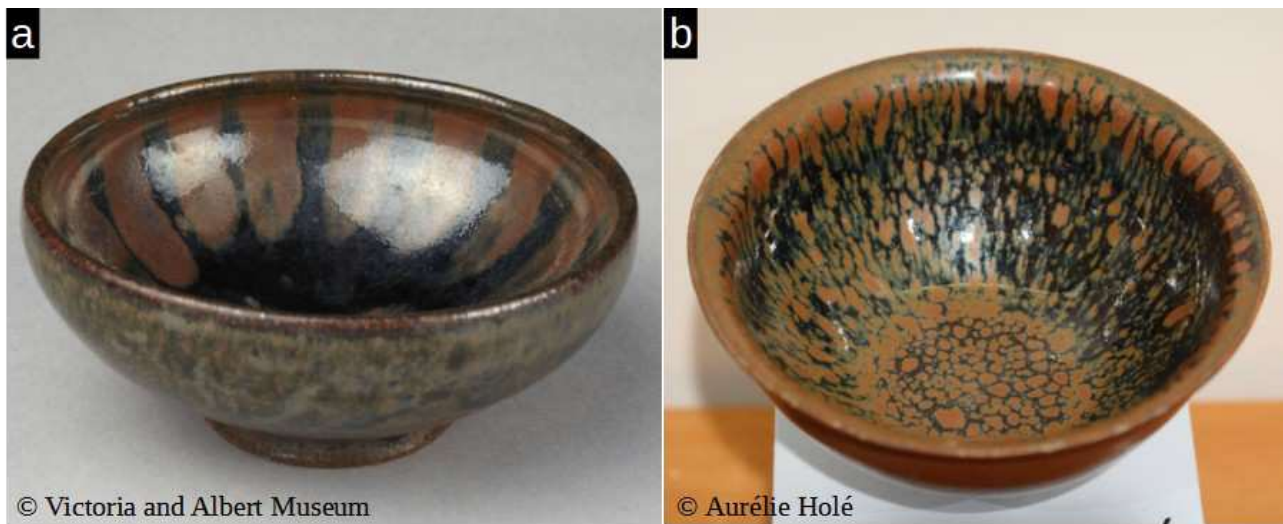


Figure 13 : Bol à décor brun « sauce » (Victoria and Albert Museum, CIRC.168-1928) (a) ;

Bol à glaçure tachetée (Musée Guimet, MA732, MA4287, MA4290 ou MA4296) (b)

Les taches qui sont disposées régulièrement sont de taille et de forme variables (de circulaires à très allongées) et effectuées à partir de deux glaçures de composition différente (cf. Figure 13-a) [83,86]. Elles sont le plus souvent désignées de manière descriptive, comme « éclaboussures » (« splashes » en anglais) ou « stries » (« streaks » en anglais) pour celles aux bords irréguliers et « taches » (« spots » en anglais) ou « rayures » (« stripes » en anglais) pour celles aux bords réguliers, voire simplement « motifs » ou « décors » (« designs », « markings » ou « decoration » en anglais). Des descriptions plus imagées sont parfois utilisées, comme « explosion stellaire » pour qualifier un bol associé aux fours de Jiàn (« starburst » en anglais) [86]. Ces glaçures sont parfois improprement appelées « fourrure de lièvre » [87,92,97], car elles ne ressemblent pas du tout à celles à coulures qualifiées comme telles, produites par les fours de Jiàn.

Les taches brun « sauce » disposées de manière plus aléatoire (cf. Figure 13-b) sont souvent dénommées « plume de perdrix » (« partridge-feather » en anglais) dans la littérature anglaise (dix descriptions sur vingt-quatre). Contrairement aux glaçures à taches brun « sauce » désignée par « plume de perdrix » dans la littérature anglophone, l'équivalent chinois de cette expression, « zhè gū bān », semble plutôt associé à des glaçures noires parsemées de taches blanches ovales, comme les plumes de *francolinus pintadeanus* (communément appelé francolin perlé). C'est également ce type de glaçure que présente Wood sous le nom « partridge-feather » [45]. Ces glaçures sont associées aux fours de Jiàn dans la littérature chinoise alors qu'elle sont plutôt liées aux fours de Nord de la Chine dans la littérature anglophone, sauf dans l'ouvrage de Wood qui les indique comme provenant des fours de Jiàn, en accord avec la littérature chinoise [45,115]. L'expression « plume de perdrix » ne figure pas dans la littérature française pour décrire les glaçures à taches brunes, qui utilise plutôt « taches de rouille » ou « écaille de tortue », qui sont associées à d'autres types de productions comme évoqué précédemment. Une occurrence de « fourrure de lièvre » a également été trouvée pour désigner ce type de glaçure. Il semble que cette expression soit employée par abus de langage pour des bols de ce type [97], puisqu'il s'agit d'imitations par les fours du Nord des « fourrures de lièvres » de Jiàn d'après Mary Tregear : « the Northern version of the 'hare's fur' glaze of the Fujian [Fújiàn] potters »¹⁰ [95]. Des expressions plus descriptives sont

10- traduction : La version du Nord des « fourrure de lièvre » produits par les potiers du Fújiàn.

également utilisées, comme « taches rousses » ou « mouchetures rousses » (« russet mottles » ou « russet flecks » en anglais, respectivement).

Même si la littérature suggère que les taches aléatoires ont également été fabriquées à l'aide de deux glaçures, il a été expérimentalement observé dans cette étude que l'apparition de taches de morphologie ressemblante pouvait se produire de manière spontanée avec une seule couche de glaçure (cf. Chapitre V : Étude de l'influence d'une sélection de paramètres environnementaux page 147). L'apparition de ces taches lors de la cuisson n'est donc pas à exclure totalement.

* *Glaçures à décors figuratifs*

Parmi les glaçures sombres à décors figuratifs, les glaçures à impression de feuille végétale font sans doute partie des céramiques produites Sòng les plus recherchées actuellement [86]. Parfois appelées « konoha tenmoku » [41,90,91] en plus de l'appellation « temmoku à feuille » évoquée précédemment, elles sont caractérisées par une glaçure noire ou brun foncé unie et brillante sur laquelle est imprimé le squelette d'une feuille d'arbre d'une couleur pâle (cf. Figure 14-a). Cette impression est, d'après la littérature, obtenue à l'aide d'une véritable feuille généralement trempée dans un mélange riche en cendres [19,92]. Dans les sources étudiées, onze objets avec une telle glaçure ont été identifiés. Il s'agit à chaque fois de bols, spécifiquement à thé pour six d'entre eux d'après les sources. Dix viennent des fours de Jízhōu, complexe de four auquel ces bols sont typiquement rattachés et sont datés de la période Sòng en général ou Sòng du Sud. Le dernier bol de ce type provient du Hénán [76], où l'utilisation de cette technique a également été documentée par Mary Tregear [95]. Sa datation est incertaine, mais supposée Táng. La paroi extérieure de ces bols est parfois décorée de motifs abstraits, comme des taches beiges du type « écaille de tortue » [92].

a



© Trustees of the British Museum

b



© Trustees of the British Museum

Figure 14 : Bol à décor d'impression de feuille (British Museum, 1973,0726.279) (a) ;

Bols à décor « paper-cut » (British Museum, 1973,0726.278 (phœnix) ; 1973,0726.277 (fleurs de prunier) et 1922,1118.1 (médaillons)) (b)

Un autre type de glaçure à décor figuratif caractéristique des fours de Jízhōu est composé des glaçures brunes ou jaunes avec des décors foncés en réserve (cf. Figure 14-b). Qualifiés de « paper-cut » en anglais, ces décors étaient vraisemblablement obtenus en appliquant par trempage une première glaçure épaisse et riche en fer sur le bol en terre crue, puis en disposant les motifs souhaités en papier découpés sur la surface du bol et les recouvrant d'une fine couche de glaçure de

composition différente. Les morceaux de papiers étaient ensuite enlevés avec la couche superficielle pour faire affleurer la couche inférieure de glaçure à la surface. Après cuisson, les décors apparaissaient ainsi plus sombres que les zones sur lesquelles la glaçure superficielle n'avait pas été retirée [45,83,92,109]. Une description disponible sur le site du Victoria and Albert Museum avance l'idée que ces décors étaient obtenus avec des motifs en cire [97]. Ils semblent avoir été principalement appliqués sur des bols, comme le suggère le fait que trente des trente-deux objets identifiés soient des bols, souvent spécifiquement à thé ou des tessons de bols. Sur ceux-ci, les motifs sont présents uniquement sur la surface intérieure des bols, l'extérieure étant généralement décorée de motif d'« écaille de tortue » comme évoqué précédemment. La glaçure extérieure d'un bol possédant ce type de décor est qualifiée de « plume de perdrix » [95]. Quelques rares objets plus gros sont ornés avec cette technique, comme un vase et un brûleur à encens [90,105]. Les céramiques décorées ainsi étaient aussi appréciées au Japon [86] où elles étaient qualifiées de « taibi tenmoku » [90].

Les motifs représentés sur ces objets sont assez standardisés, composés principalement de phœnix ou faisans, fleurs de prunier, branches d'arbres en fleur et médaillons quadrilobes. Tous ces objets sont datés de la période Sòng en général ou Sòng du Sud sauf un dont la datation est inconnue et vingt-huit des trente-deux objets de cette catégorie proviennent de la province du Jiāngxī, plus spécifiquement des fours de Jízhōu ou de Yǒnghé. Parmi les quatre autres, deux n'ont pas de provenance précise, un est supposé venir des fours de Jiàn [105] et un autre de Chine du Nord [107].

Des motifs figuratifs blancs sur fond sombre étaient également obtenus en réserve à l'aide d'un engobe blanc recouvert d'une glaçure foncée. Ces décors semblent réservés à de plus gros objets que les bols, puisque sur les neuf objets identifiés, seul l'un d'entre eux est un bol, les autres étant des vases, des bouteilles et une assiette. Ils semblent avoir été principalement produits dans le Jiāngxī, même si l'assiette a été identifiée comme venant de Yàozhōu (Shǎnxī). Les productions du Jiāngxī sont datées de la période Sòng du Sud ou Yuán et l'assiette de la période Táng. Une bouteille de ce groupe sans provenance est quant à elle datée de la dynastie Míng et qualifiée de « Cízhōu type », suggérant que ce type de décor pouvait être typique des fours du Nord de la Chine. Il peut néanmoins s'agir également d'un rapprochement avec les glaçures décorées par sgraffito qui sont typiques de ces fours.

Les décors par sgraffito constituent justement un autre groupe de décors figuratifs. Vingt-cinq objets de ce type ont été retenus, principalement des vases, jarres, oreillers et bouteilles. De nombreux autres ont également été vus mais non considérés dans ce corpus d'objets étudiés car il s'agit d'une technique de décor très spécifique et reconnaissable (cf. Figure 8-a). La majorité de ces objets dont la provenance est connue sont issus de Cízhōu ou de la province du Héběi, sauf trois des fours de Cíyáobǎo (Níngxià) [85,92], un de la province du Shǎnxī [105] et un des fours de Jízhōu¹¹ [85]. Pour ceux dont la provenance est inconnue, la plupart est qualifiée de « Cízhōu type ». Leur datation est très variable, entre Sòng du Nord et Yuán ou Míng.

Les artisans ont également obtenu des motifs figuratifs en peignant avec une glaçure claire sur un fond plus foncé.

11- Pour ce bol, il est difficile de savoir s'il s'agit réellement d'un décor en sgraffito ou seulement d'un décor peint en noir sur l'engobe blanc.

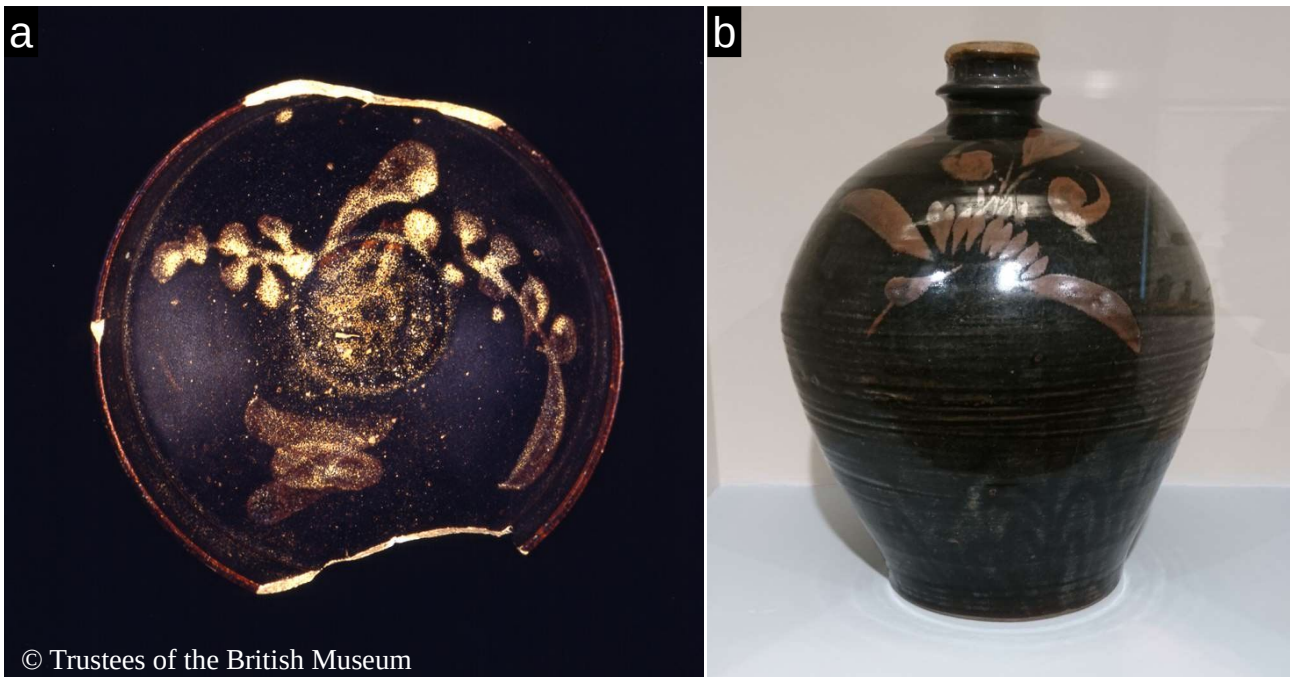


Figure 15 : Bol à décor floral peint beige (British Museum, 1938,0412.47) (a) ;

Jarre à décor d'oiseau peint brun « sauce » (Musée Guimet, EO2434) (b)

Dans les fours du Jiāngxī, des motifs floraux beiges ont été peints à l'intérieur de bols ou d'assiettes contrastant avec la glaçure noire ou brun foncé (cf. Figure 15-a). Ces décors semblent appliqués sur le fond sombre, même si la description d'un objet du Smithsonian Museum parle de motif sous-couverte [106]. Sept objets ont été identifiés comme possédant ce type de décor, datés des dynasties Sòng ou Yuán. Un seul d'entre eux est indiqué comme provenant d'un four autre que ceux Jiāngxī, en l'occurrence des fours de Jiàn [105].

Des motifs floraux brun « sauce » ont également été peints sur des fonds noirs (cf. Figure 15-b). Ils ont été identifiés sur vingt-trois objets de type variés : bols, vases, bouteilles, verseuses ou jarres. Sur les deux bols, les décors sont peints sur la surface intérieure. Tous ces objets sont datés de la dynastie Jīn (parfois possiblement Yuán), sauf deux dont la datation n'est pas précisée [89,95]. Ceux dont la provenance est connue viennent de diverses provinces Chine du Nord, comme du Héběi [87], du Hénán [41,85,89,105], du Shǎnxī [106] ou du Shānxī [106] et sont souvent qualifiés de « Cízhōu type » [92,106]. Seul un bol, daté de l'époque Yuán, proviendrait quand à lui du Sud de la Chine, du Fújiàn ou du Zhèjiāng [95].

Enfin, certains bols à glaçure sombre étaient ornés de motifs figuratifs, souvent similaires à ceux des décors « paper-cut » du Jiāngxī, faits à l'aide de feuille métallique d'or ou d'argent. Cette pratique semble avoir été principalement utilisée dans les fours de Dìng [90,92,95], ce qui n'est pas surprenant vu la clientèle fortunée qui pouvait se procurer des pièces de ce four impérial.

D – Céramiques noires et brunes après la dynastie Sòng

1) Céramiques noires et brunes sous les dynasties postérieures aux Sòng

Sur le territoire autrefois occupé par les Sòng, il semble que la production des différents types de céramiques à glaçure noire et brune a partiellement continué au cours de la dynastie Yuán, en particulier pour les décors produits en Chine du Nord sous la dynastie Jīn pris par les mongols dès 1324. Néanmoins, le déclin, voire le rejet du statut social des lettrés opéré sous cette dynastie a impacté négativement de manière très forte la production des glaçures noires et brunes, en particulier celles de Jiàn dont les céramiques existaient principalement pour l'art du thé pratiquée par cette classe [46,79].

Les Yuán préférant les pièces plus grandes, de formes plus complexes et aux couleurs plus vives, la qualité des pièces sobres monochromes de nombreux grands fours a drastiquement diminué à cette période [46], parfois au profit de productions secondaires possédant des glaçures foncées comme les productions dichromes noires et blanches des fours de Yàozhōu [50].

Les glaçures noires et brunes, en particulier les monochromes bruns, semblent avoir connu un nouvel essor à travers les productions dites « purple gold » de Jǐngdézhèn sous les dynasties Míng et Qīng. Ces glaçures sont très similaires aux glaçures brun « sauce » produites par les fours du Nord de la Chine sous la dynastie Sòng et ont été particulièrement populaires sous les règnes de Kāngxī (1661-1722) et Qiánlóng (1735-1796) [116]. Malgré cet essor, leur production reste assez marginale d'un point de vue global sur tout le territoire contrôlé par ces dynasties. Les collections muséales présentent également des boîtes à thé à glaçure sombre, parfois monochromes, parfois mouchetées avec des couvercles circulaires en ivoire [106,107]. Ces dernières sont datées des dynasties Yuán ou Míng et le choix de ces couleurs de glaçure au vu de leur fonction peut être vu comme un clin d'œil aux productions de Jiàn.

De plus, il est indéniable que les productions de l'époque Sòng ont également influencé considérablement l'art céramique d'autres civilisations, en particulier celui lié à la consommation du thé en Corée et au Japon. Des similarités évidentes peuvent être par exemple observées entre l'esthétique japonaise dite « wabi-suki » avec les bols à thé de type raku noir et les considérations esthétiques des lettrés Sòng vis-à-vis des productions de Jiàn. L'étude de ces influences constituant un travail à part entière, elles ne sont pas davantage explorées ici.

2) Céramiques noires et brunes actuelles inspirées des productions Sòng

Aujourd'hui, les céramiques noires et brunes Sòng ont regagné une visibilité nationale et internationale importante. Les mystères de la production des motifs spontanés des productions de Jiàn et des décors à impression de feuille de Jízhōu pour les artisans-potiers, ainsi que la découverte du rare oxyde de fer $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ par la communauté scientifique à la surface de ces productions qui est le centre d'intérêt principal des chapitres suivants [117] semblent être les principales causes de ce regain d'intérêt.

Les exemplaires parfaitement préservés de ces types de bols datés de la période Sòng sont aujourd'hui considérés comme des trésors nationaux ou des objets de première importance

culturelle au Japon [90,91]. De plus, plusieurs artisans chinois travaillant sur la recreation des bols de Jiàn sont très reconnus à l'échelle nationale et célèbres internationalement comme Sūn Jiànxiàng, Lǐ Dá et Chén Dàpéng. Certaines de leurs productions actuelles ou d'autres artisans avec des motifs spécifiques se vendent à des prix exorbitants [118]. D'autres sont également entrées dans les collections de grands musées, par exemple le musée Guimet ou le Victoria and Albert Museum [94,107].

Les travaux de créations ne sont pas limités aux artisans chinois, comme le prouvent les nombreux articles de blogs ou de revue publiés par des artisans potiers de toutes nationalités [96,119–121]. Des travaux de créations de ces types de glaçures à partir de matière industrielle recyclée ont même été récemment publiés, attestant de la visibilité de ce type de glaçure [122].

Chapitre II : Contexte scientifique et méthodes

A – Céramiques noires et brunes Sòng dans la littérature en sciences des matériaux

1) *État de l'art*

Malgré la notoriété de certains types de céramiques Sòng à glaçure noire et brune décrites dans le chapitre précédent, ces objets ont été relativement peu étudiés par rapport aux porcelaines bleues et blanches ou encore aux céladons par exemple. Dans l'une des premières études de tessons de céramiques à glaçure brune du site de « Chiao Tso » [Jiāozuò] (Hénán) publiée en 1943, il est indiqué que « very little had been discovered of the brown ware »¹² [123]. L'observation de ces fragments a révélé que leur glaçure est constituée de deux couches : une première épaisse et très sombre au dessus de laquelle se trouve une seconde très fine de couleur « brun-noix ».

Plusieurs études ont ensuite été publiées dans « Scientific and Technological Insight on Ancient Chinese Pottery and Porcelain », actes de la conférence internationale sur la céramique chinoise ancienne tenue à Shànghǎi en novembre 1986. Les travaux présentés dans cet ouvrage sont malheureusement inaccessibles. Seuls les titres sont disponibles en ligne et indiquent que quatre d'entre eux se concentrent sur les glaçures fabriquées dans les fours de Jiàn (Fújiàn) et des imitations modernes de ses productions.

Elles sont néanmoins citées par Nigel Wood dans le chapitre 7 de son livre « Chinese Glazes: their Origins, Chemistry and Recreation » publié en 1999, qui se concentre sur les productions à glaçures noires et brunes [45]. Il y présente notamment des tableaux de composition chimique mesurée sur des bols noirs et bruns provenant de nombreux fours différents. Ces analyses font ressortir des variations de composition entre les glaçures produites au Nord et au Sud, notamment leurs taux d'oxydes de phosphore et de magnésium. Le taux d'oxyde de phosphore est très faible voire nul dans les glaçures du Nord alors qu'il est légèrement supérieur à 1 % dans les glaçures du Jiàn et se rapproche de 2 % dans celles de Jízhōu (Jiāngxī). L'oxyde de magnésium est, quant à lui, inférieur à 2 % dans les glaçures de Jiàn analysées, autour de 2,5 % dans les glaçures sombres du Nord et autour de 3 % dans celles de Jízhōu. Le rôle de fondant de ce dernier est discuté rapidement dans les productions de Jízhōu, alors que les variations en oxyde de phosphore ne sont pas explicitement commentées [45]. Des analyses chimiques des pâtes sont également présentées, tout comme dans l'ouvrage de référence sur les céramiques de la série « Science and Civilisation in China » de Joseph Needham publié en 2004 [31].

Dans la même période, une étude des ratios entre Fe^{2+} et Fe^{3+} a également été menée par spectroscopie Mössbauer sur des échantillons de glaçure de bols provenant de Jízhōu. Ce travail a montré que l'atmosphère de cuisson des pièces était principalement neutre, mais avec des variations parmi les pièces étudiées [124].

12- *traduction* : très peu de choses ont été découvertes à propos des productions à glaçure brune.

En 2008, des analyses microstructurales menées sur les glaçures de tessons de « fourrure de lièvre » provenant des fours de Jiàn ont révélé la présence à leur surface de nombreux cristaux dendritiques de taille micrométrique identifiés à l'époque par Diffraction des Rayons X (XRD pour X-Ray Diffraction) comme de l'hématite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) et de la maghémite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), deux oxydes ferriques relativement communs. Elles ont également révélé sur certains tessons la présence de « fleurs » d'anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), défauts locaux constitués de long cristaux d'anorthites autour desquels les cristaux d'oxydes ferriques semblent croître davantage. Cette étude propose également un premier mécanisme de formation de ces motifs particuliers : au cours de la cuisson, la surface est enrichie en fer localement par la remontée de bulles créées par la décomposition des oxydes dans le cœur de la glaçure. Cet enrichissement local crée des zones où la glaçure, plus visqueuse, coule le long de la paroi du bol, créant les marbrures typique des « fourrures de lièvre ». Au cours du refroidissement, les oxydes de fer précipitent d'abord autour de l'anorthite qui les retient [98]. Ce mécanisme est également repris par une autre étude sur les glaçures de Jiàn de 2014 qui, constatant que les glaçures « fourrure de lièvre » et « gouttes d'huile » ont une composition similaire, propose qu'une différence de température de cuisson explique les deux résultats. En effet, d'après ce travail, une température plus faible rend la glaçure plus visqueuse et prévient son écoulement le long des parois, favorisant l'aspect « goutte d'huile » plutôt que « fourrure de lièvre ». Cette étude note également des craquelures dans des cristaux de quartz, suggérant une cuisson relativement rapide [99].

En 2014, une nouvelle étude effectuée sur des échantillons de glaçures « fourrure de lièvre » et « gouttes d'huile » de Jiàn a bouleversé la perception de ce type de glaçure. Ce travail, couplant différentes techniques de laboratoire, en particulier de la spectroscopie Raman, et de la micro-diffraction sur ligne synchrotron pour obtenir un diagramme de meilleure résolution qu'avec les appareils de laboratoire, a révélé la présence d'un oxyde de fer différent de l'hématite et la maghémite précédemment identifiés, présent pur dans les « gouttes d'huile » et en mélange avec de hématite dans les coulures des « fourrures de lièvre » : l'oxyde $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [117].

Cet oxyde ferrique, décrit comme un intermédiaire entre l'hématite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) et la maghémite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) [125], est mentionné pour la première fois en 1934 avec la mesure de sa température de Curie [126]. Ses propriétés magnétiques ont été étudiées plus en profondeur et il a été nommé $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ dans les années 1960-70 [127–129]. Il faudra néanmoins attendre 1998 pour que sa structure soit complètement déterminée comme étant orthorhombique du groupe d'espace $\text{Pna}2_1$, isomorphe de AlFeO_3 et GaFeO_3 [125]. Cette détermination fut suivie en 2002 par une revue de littérature sur les oxydes ferriques qui présentait les membres cette famille en citant leurs potentielles applications [130]. À la suite de la parution de cette revue montrant le potentiel de cette phase, le nombre de travaux sur $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ est monté en flèche, avec d'une part des études approfondies de ses propriétés magnétiques [131–136], optiques [136,137] et catalytiques [138], d'autre part le développement de nouvelles voies de synthèses de nanoparticules par procédé sol-gel [139–145], imprégnation de silice poreuse [146–149], oxydation interne d'alliage de palladium [150] ou dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PE-CVD pour Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition) [151] et de films minces par ablation laser pulsée [152,153], ALD (pour Atomic Layer Deposition) [154] ou électro-dépôt [155].

La plupart de ces méthodes de synthèse, en particulier celles qui possèdent une étape de recuit, sont basées sur la transformation $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ et cherchent à s'arrêter au bout de la première étape [156]. Les paramètres du recuit sont cruciaux pour obtenir la phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ désirée [143,157], et ce chemin explique pourquoi elle est souvent accompagnée par de l'hématite [144,145] et/ou de la maghémite [156,158]. Sa faible stabilité thermodynamique favorise en effet fortement sa transformation en hématite [156]. Néanmoins, sa faible énergie de surface par rapport à celle de l'hématite permet l'élaboration de nano-objets stabilisés par leur petite taille et prévient dans ce cas la transformation $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [117,158–160]. Cette stabilisation nécessaire par la taille dans les méthodes de synthèse actuelles contraste fortement avec sa présence dans les glaçures de Jiàn, où les dendrites observées dépassent régulièrement la dizaine micromètres [117]. De plus, il a été noté que l'ajout de sels alcalino-terreux (comme de calcium ou de baryum) lors des procédés de synthèse par voie sol-gel favorisent sa pureté [157,158,161].

Avant d'être identifiée sur les glaçures chinoises, cette phase avait été détectée sur des glaçures de grès japonais Bizen, où de petits cristaux poussent en épitaxie sur des aiguilles de mullite [162]. Cette découverte à la surface les glaçures de Jiàn, ainsi que l'identification de son spectre Raman très caractéristique et mesurable facilement de manière non-invasive a causé une multiplication des études sur les céramiques chinoises à glaçures brunes et noires. Sa présence a depuis été reconfirmée dans la littérature à la surface ainsi que sur des défauts à l'aspect similaire aux fleurs d'anorthites mais composé de mullite des glaçures de Jiàn [163]. Cette phase a également été documentée sur les glaçures « gouttes d'huile » des fours de Xiāo (Ānhuī) [164] et les glaçures brunes et noires des fours de Yàozhōu (Shǎnxī) [165], Qīlǐzhèn (Jiāngxī) [112], Qīngliángsi (Hénán) [166] et Dìng (Héběi) [167]. Elle a également été détectée dans plusieurs glaçures brunes d'autres époques, comme dans les parties brunes des céramiques trichromes des fours de Chángshā produites sous la dynastie Táng [51] ou les céramiques brunes dites « purple-gold » produites dans les fours de Jǐngdézhen sous la dynastie Qīng [116].

En plus de former une base de données bien documentée sur la présence de phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ dans les glaçures anciennes, ces études tendent à faire le lien entre la couleur brune caractéristique de la majorité de ces glaçures et la présence de la phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [116,165], dont la longueur d'onde de coupure a été mesurée autour de 520 nm pour une suspension de nanoparticules lui donnant une teinte orangée [136]. Cette longueur d'onde est légèrement inférieure à celle de l'hématite, typiquement mesurée autour de 560 à 580 nm [168], ce qui lui donne une teinte plus rouge.

Certaines études proposent également des mécanismes de croissance des cristaux de $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, par exemple une étude de 2019 qui s'appuie sur la reconstruction de cristaux en 3 dimensions par microscopie électronique couplée avec une sonde ionique focalisée. Elle montre ainsi que les germes se développent d'abord en cristaux légèrement aplatis de l'ordre de 100 à 300 nm sur lesquels les commencements de quatre branches primaires sont visibles. Ces branches primaires croissent ensuite, parfois rejointes par d'autres (certaines structures possédant plus de huit branches primaires ont été observées). Des branches secondaires se développent ensuite sur les branches primaires, puis des branches tertiaires sur les secondaires et ainsi de suite jusqu'à donner les structures dendritiques caractéristiques observées [112]. Les mécanismes proposés avant la découverte de la phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, consistant en la remontée de bulles enrichissant la surface en fer qui conduisent à la cristallisation de la phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ lors du refroidissement [98,99], ont également été repris en intégrant la cristallisation de cet oxyde pour interpréter la présence de la couche

superficielle brune des glaçures saucées anciennes [165]. Malgré ces propositions, il semble qu'aucune étude en température n'a été effectuée pour vérifier ces hypothèses et déterminer l'étape de la cuisson lors de laquelle la cristallisation de la phase ϵ -Fe₂O₃ a réellement lieu.

De plus, même si les glaçures brunes et noires anciennes ont été très étudiées depuis cette découverte, seuls quelques travaux de recréations ont été effectués puis analysés. La plupart d'entre eux présentent des glaçures de type « gouttes d'huile » visuellement très ressemblantes aux objets anciens, cependant les analyses n'ont révélé la présence que d'hématite et de magnétite à leur surface [111,122]. En outre, bien que de nombreux artisans travaillent aujourd'hui sur ce genre de glaçure dans le monde entier et obtiennent des résultats magnifiques, les études scientifiques menées sur leurs recréations demeurent relativement peu nombreuses.

2) *Problématique relevant des sciences des matériaux*

La totalité des études récentes menées sur les glaçures noires et brunes de la dynastie Sòng présente des objets dont les glaçures sont constituées d'un matériau systématiquement comparable : la surface est constellée de cristaux de phase ϵ -Fe₂O₃ dendritiques, d'une taille sub-micrométrique à plusieurs dizaines de microns. Pourtant, ces objets ont un aspect global (à l'échelle macroscopique) très diversifié : certaines glaçures sont unies, d'autres possèdent des motifs de différentes couleurs (couleurs brunes, mouchetures argentées...).

De telles similarités à l'échelle microscopique sont ainsi vivement surprenantes, surtout en considérant que ces objets ont été fabriqués avec des matières premières différentes, cuits dans des fours de type différent à plusieurs milliers de kilomètres d'écart les uns des autres comme évoqué dans le chapitre précédent. Elles sont d'autant plus étonnantes que la phase ϵ -Fe₂O₃ est considérée comme un intermédiaire métastable entre la maghémite et l'hématite [117,125,149,161] et que des recréations, même visuellement très convaincantes, ne contiennent pas cette phase.

Le seul point commun à l'échelle macroscopique entre tous les échantillons étudiés est l'aspect final de la glaçure, en particulier sa couleur brune caractéristique et noire. Cela n'est pas négligeable, car il s'agit sans doute du point le plus important sur lequel les potentiels acheteurs décideront ou non d'acquérir l'objet. Il s'agit de l'aboutissement des expériences menées par les artisans Sòng pour combler les désirs de leurs clients. Cet aspect étant lié en toute vraisemblance à la microstructure de la surface de la glaçure, il est possible de dire que les artisans ont optimisé leurs paramètres de cuisson de manière à synthétiser ce matériau tout à fait particulier.

L'objectif de la suite de cette étude est ainsi de comprendre la formation, du point de vue de la sciences des matériaux, des cristaux dendritiques de phase ϵ -Fe₂O₃ typiques des glaçures brunes de la famille des céramiques brunes et noires riches en fer de la dynastie Sòng. Pour cela, une série d'expérimentations a été effectuée sur des échantillons archéologiques, des recréations modernes artisanales et des matières premières typiquement utilisées pour ce genre de production.

B – Présentation du corpus étudié

Afin d'effectuer ces expérimentations, un corpus d'échantillons représentatifs a été établi. Il se compose de deux types d'échantillons : des échantillons de céramiques et des échantillons de matière première prélevés sur des sites archéologiques de fours et d'autres fournis par les artisans qui les utilisent pour leurs productions contemporaines. Les échantillons en céramique étudiés sont de différentes natures : des tessons de bols anciens récupérés sur des sites archéologiques, des tessons de récréations et d'éprouvettes tests fabriqués par des artisans dans le cadre de leurs travaux. Des bols conservés dans les collections du Musée Georges Labit (17 Rue du Japon, 31400 Toulouse, France) et du Musée des Arts de la Table de l'Abbaye de Belleperche (Route de Belleperche, 82700 Cordes-Tolosannes, France) ont également été analysés pour cette étude.

1) Échantillons issus de céramiques archéologiques

Les tessons de bols anciens ont été répartis en différentes séries en fonction des sites archéologiques sur lesquels ils ont été prélevés.

La série **BG** contient seize tessons numérotés respectivement de BG-01 à BG-16. Les tessons BG-01 à BG-12 (cf. Figure 16) ont été ramassés sur le site archéologique de Huángpǔ du district de Yàozhōu, qui se trouve dans la préfecture de Tóngchuān (Shǎnxī). BG-01 à BG-04 ont été fournis par le musée des fours de Yàozhōu (Tóngchuān, Shǎnxī, 727001 Chine) et BG-05 à BG-12 par l'institut provincial d'archéologie de la province du Shǎnxī (Xī'ān, Shǎnxī, 710043 Chine).



Figure 16 : Tessons BG-01 à BG-12 provenant du site de Huángpǔ (Shǎnxī)

Les tessons BG-13 à BG-16 (cf. Figure 17) ont été ramassés sur le site archéologique de Yīngōu du district de Fùpíng, qui se trouve dans la préfecture de Wèinán (Shǎnxī). Ils ont été fournis par l'académie d'archéologie du Shǎnxī (Xī'ān, Shǎnxī, 710043 Chine) et ne sont arrivés en France pour étude que le 15 mars 2022.

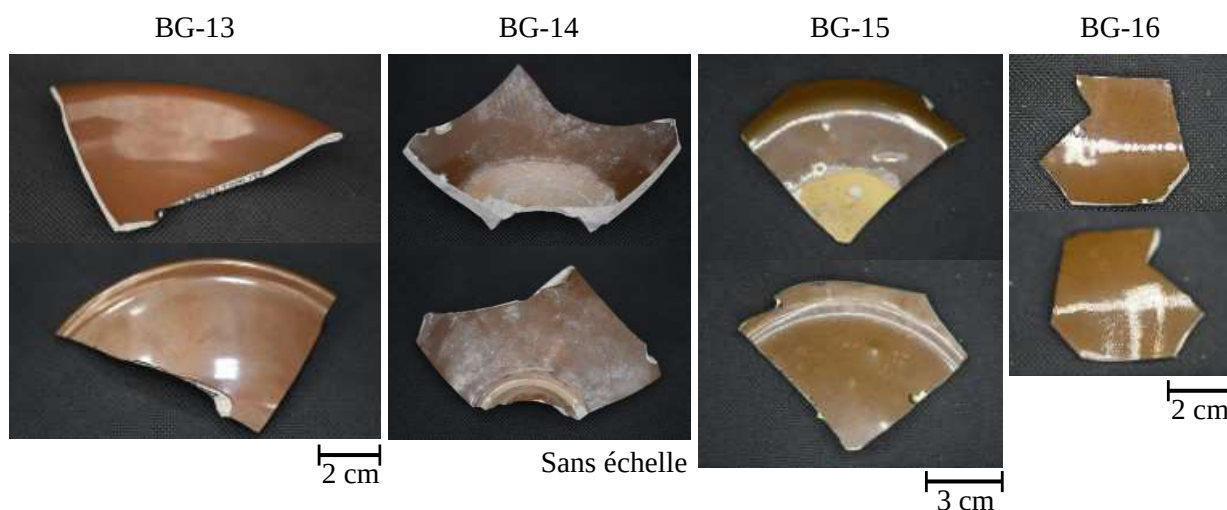


Figure 17 : Tessons BG-13 à BG-16 provenant du site de Yīngōu (Shǎnxī)

Tous ces échantillons ont été datés de la période des Sòng du Nord (960-1127) d'après l'étude des couches archéologiques dans lesquelles ils ont été retrouvés. Afin d'être envoyés en France pour y être étudiés, des échantillons représentatifs de chaque tesson ont été prélevés à l'aide d'une scie circulaire par l'équipe de Tian Wang de l'Institute of Silicate Cultural Heritage (School of Material Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology). Les photographies des prélèvements étudiées en France sont présentées en Annexe 3 : Corpus détaillé des échantillons disponibles page 252. Les fragments de tessons laissés à l'Institute of Silicate Cultural Heritage y ont été étudiés en parallèle des études menées au CEMES. La plupart des échantillons de cette série ont des pâtes gris clair peu granuleuses qui s'éclaircissent généralement à l'interface entre la glaçure et la pâte. BG-03, BG-04 et BG-05 ont des pâtes d'une couleur significativement différente des autres échantillons, respectivement gris foncé, beige clair et grise. L'éclaircissement de la pâte à l'approche de l'interface avec la glaçure est visible sur BG-03 et BG-05, mais pas sur BG-04. À l'exception des échantillons BG-02, BG-03, BG-04 et BG-11, tous les autres échantillons de la série BG possèdent une glaçure brillante et opaque de couleur unie brun « sauce ». BG-02 et BG-11 possèdent une glaçure plus sombre avec des décors de cette couleur typique. BG-03 possède quant à lui deux glaçures différentes, une brun foncé légèrement translucide fine à l'intérieur du bol et sur la portion proche du pied de l'extérieur et une noire brillante plus épaisse sur la partie supérieure de la paroi extérieure. Enfin BG-04 possède une glaçure noire avec des mouchetures brunes de type « taches de rouille » sur la paroi intérieure et le haut de la paroi extérieure et une glaçure de couleur brun « sauce » proche du pied sur la paroi extérieure du bol.

La série **LHP** contient quatre tessons, numérotés de LHP-01 à LHP-03 et Luhūwū (cf. Annexe 3 : Corpus détaillé des échantillons disponibles page 252). Ils ont été ramassés sur le site archéologique de Lúhūpíng qui se trouve proche de la ville de Shuǐjǐ du district de Jiànyáng, qui se trouve dans la préfecture de Nánpíng (Fújiàn). La série **DLHM** contient cinq tessons, numérotés respectivement DLHM-04, DLHM-06, DLHM-19, DLHM-36 et DLHM-40 (cf. Figure 18). Ils ont été ramassés sur le site archéologique de Dàlùhòumén qui se trouve également proche de la ville de Shuǐjǐ (Fújiàn). Ces deux séries ont été fournies par l'institut de recherche des céramiques des fours de Jiàn (Nánpíng, Fújiàn, 353000 Chine) et sont datées de la dynastie Sòng.

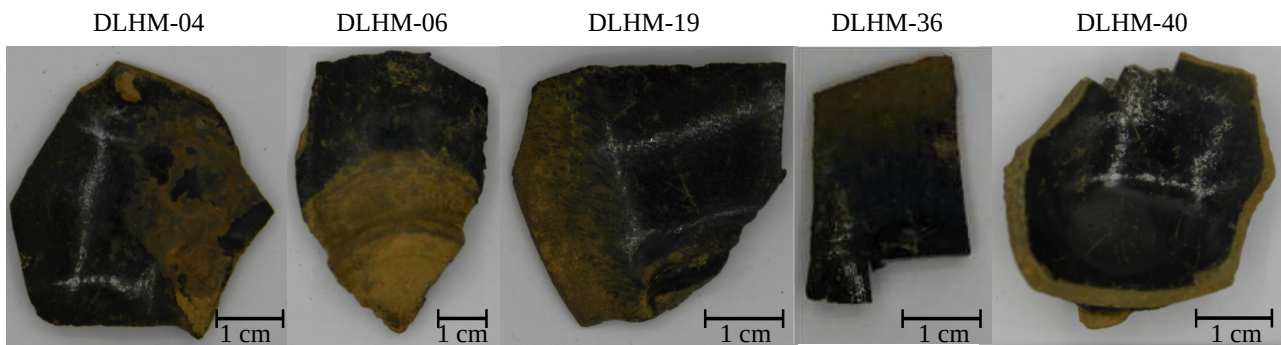


Figure 18 : Tessons de la série DLHM provenant du site de Dàlùhòumén (Fújiàn)

Les tessons de la série LHP ont été directement envoyés en France, alors que des échantillons représentatifs de DLHM-19, DLHM-36 et DLHM-40 ont été préalablement découpés pour être envoyés en France (cf. Annexe 3 : Corpus détaillé des échantillons disponibles, page 252), et trois coupes transverses montées en résine de DLHM-04, DLHM-06 et DLHM-19 ont été préparées par l'équipe de Tián Wáng et envoyées en France. Les tessons et échantillons de ces deux séries possèdent des caractéristiques similaires, en particulier une pâte noire granuleuse, avec notamment de gros grains clairs qui ressortent sur son fond sombre, sauf pour l'échantillon DLHM-19 qui a une pâte gris foncé granuleuse avec une interface nette beaucoup plus claire entre la pâte et la glaçure. Les pâtes des tessons LHP exposées à l'environnement ont emprisonné dans leurs pores des grains de terre rouge orangé. Leurs glaçures sont relativement épaisses (plusieurs centaines de microns) et présentent toutes des motifs de type « fourrure de lièvre », particulièrement prononcés sur celles de LHP-02, LuhúWu et DLHM-36. Les coulures de LHP-03 ne sont pas brunes comme les glaçures « fourrure de lièvre » usuelles mais translucides légèrement argentées. LHP-01 possède une couleur brune un peu plus rousse que les autres échantillons et sa glaçure ne présente quasiment pas de noir à sa surface. Enfin la glaçure de l'échantillon DLHM-19 semble très dégradée, seule une petite zone apparaît brillante avec les coulures brunes typiques, le reste de sa surface apparaît brun, mat et rugueux.

La série **BZ** contient trois tessons numérotés de BZ-01 à BZ-03 (cf. Annexe 3 : Corpus détaillé des échantillons disponibles page 252). Ils ont été ramassés par le collectionneur chinois Jiali Sha sur le site archéologique des fours de Tiānmù (Zhèjiāng). Ils sont datés de la dynastie Sòng et ont été fournis pour enrichir le corpus d'échantillons archéologiques par Bing Zhao le 12/02/2021. Le tesson BZ-01 présente des caractéristiques très similaires aux échantillons des séries LHP et DLMH : une pâte noire et granuleuse et une glaçure apparentée à la famille des « fourrures de lièvre ». La paroi du bol est plus épaisse que celles des échantillons des séries LHP et DLHM et les pores de la pâte exposés à l'environnement ont piégé une terre beige. Les tessons BZ-02 et BZ-03 sont très différents de BZ-01 : ils ont une pâte blanche, fine (i.e. non granuleuse) et de paroi relativement épaisse (de l'ordre de 5 mm). La glaçure de BZ-02 semble translucide, comme le suggère son éclaircissement au niveau de la lèvre où l'on devine la blancheur de la pâte. Sa couleur n'est pas homogène : des motifs irréguliers brun clair se dessinent sur le fond plus foncé. La glaçure de BZ-03 a, sur la partie convexe du tesson (probablement la paroi extérieure du bol), une couleur brun foncé hétérogène, sans doute car la glaçure qui semble translucide est répartie avec une épaisseur variable. La glaçure de la partie concave (probablement la paroi intérieure du bol) possède

quant à elle deux couleurs distinctes, un brun orangé assez clair et un brun très foncé. La frontière entre ces deux couleurs est nette et régulière.

Le tesson **TZ-28** (cf. Annexe 3 : Corpus détaillé des échantillons disponibles page 252) a été ramassé sur le site archéologique des fours impériaux de Dìngzhōu (Héběi). Il a été fourni par le musée d'anthropologie de l'université de Sun Yat-sen. Il a été identifié comme provenant d'un bol de porcelaine brune et noire produit lors de la période des Sòng du Nord (960-1127). Quelques analyses préliminaires avaient déjà été effectuées sur cet échantillon, en particulier de l'imagerie par microscopie électronique à balayage, de la spectroscopie Raman et de l'analyse élémentaire par microsonde par Philippe Sciau [167]. Ce tesson est formé d'une pâte blanche et fine, avec une paroi très peu épaisse (environ 2 mm d'épaisseur) typique des productions de Dìng et d'une glaçure foncée assez épaisse (plusieurs centaines de microns). Sa couleur n'est pas homogène, contrairement aux glaçures noires et brunes habituellement produites par cet atelier : elle possède des zones brunes séparées par des nervures et mouchetures noires et de nombreux cristaux cramoisis foncés sont parsemés à sa surface.

2) *Échantillons issus de recreations modernes*

Ce corpus d'échantillons archéologiques a été associé à quelques tessons de recreations fournis par des artisans qui produisent des céramiques à glaçures foncées dans la veine de celles produites par les artisans Sòng.

Deux tessons de recreations fabriqués par Sūn Jiànxìng, artisan spécialisé dans les glaçures noires et brunes et reconnu par de nombreux prix nationaux, numérotés respectivement SUN-1 et SUN-2 ont été étudiés. Il s'agit de glaçures dites « yào biàn » en chinois, c'est-à-dire noires avec un décor « gouttes d'huile » et des reflets bleutés. La couleur des reflets de ces échantillons varie du vert à un bleu profond. Ces tessons ont été comparés avec deux tessons nommés respectivement G-plissé et G-lisse ayant un aspect visuel macroscopique très similaire, avec une glaçure noire avec des reflets bleutés fabriqués par Jean Girel, artisan céramiste français spécialiste de la céramique des Sòng, qui ont été préalablement caractérisés¹³ et fournis pour des analyses complémentaires par Patrice Lehuédé.

3) *Éprouvettes tests artisanales modernes*

En plus des recreations à proprement parler, les artisans de la société Yaozhou Kiln Lijia Porcelain Workshop Co. LTD ont fabriqué dans le cadre de leur travail de redécouverte des savoir-faire traditionnels et de fabrication de recreations des éprouvettes tests.

Cette série d'éprouvettes notée **ZJ** a été fabriquée par Ren Shuanmin. Il s'agit de huit échantillons, numérotés de ZJ-01 à ZJ-08, fabriqués et cuits dans les mêmes conditions de cuisson que les recreations produites par cette société. Tout d'abord la glaçure crue fabriquée en mélangeant un loess local broyé avec de l'eau est appliquée sur une pâte à céramique achetée dans un atelier local par trempage. Une fois la couche de glaçure désirée déposée, les éprouvettes ont été laissées

13- Caractérisation effectuée par microscopie optique et électronique à balayage couplée avec analyse dispersive en énergie des rayons X au C2RMF (Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France).

5 heures dans une pièce ventilée pour sécher. Elles ont ensuite été soumises au cycle thermique appliqué habituellement aux re créations dans un four un four à gaz équipé d'évents qui permettent un contrôle qualitatif de l'atmosphère de la chambre en cours de cuisson (cf. Figure 19).

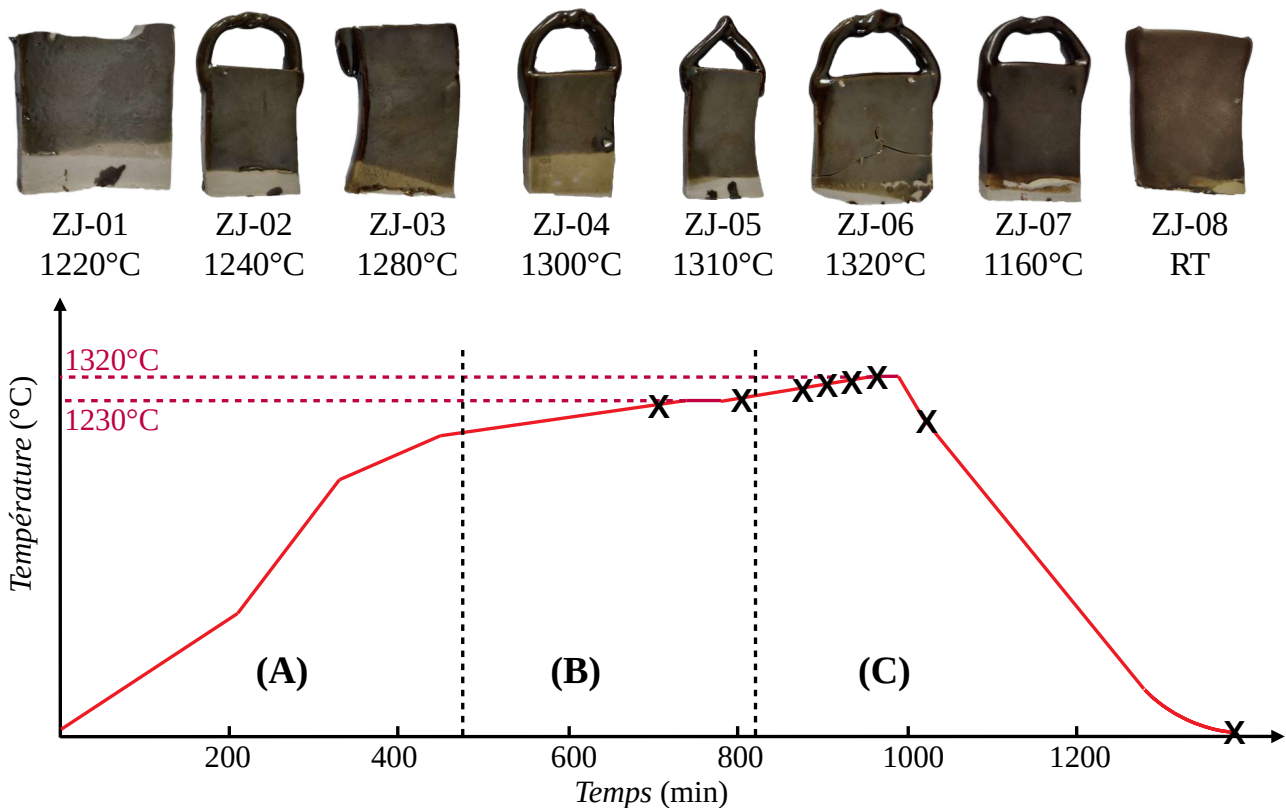


Figure 19 : Éprouvettes de la série ZJ et cycle thermique utilisé pour leur fabrication

Ce cycle se divise en trois parties principales : une montée en température assez rapide en plusieurs segments sous atmosphère ambiante (A), avec les événements du four complètement ouverts, une montée en température plus lente sous atmosphère plus réductrice (B) coupée par un palier de 30 minutes à 1230°C, puis la fin de la montée jusqu'à atteindre 1320°C suivie d'un palier de 30 minutes à cette température et de la descente en température par inertie sous atmosphère partiellement oxydante (C), avec les événements entre-ouverts.

Afin de documenter les processus chimiques mis en jeu au cours de la cuisson, les éprouvettes ont été successivement sorties du four aux températures indiquées (X sur la courbe de température) et soumises à une trempe à l'air pour figer la microstructure de leur glaçure. Comme pour les tessons archéologiques des séries BG et DLHM, des échantillons représentatifs de chaque éprouvette ont été prélevés à la scie par Ren Zhao de l'Institute of Silicate Cultural Heritage pour être envoyés au CEMES. Quelques analyses sur la partie des éprouvettes gardée en Chine ont également été effectuées à l'Institute of Silicate Cultural Heritage.

4) Matières premières

En plus des échantillons en céramique présentés ci-dessus, trois matières premières chinoises de provenances différentes ont également été étudiées (cf. Figure 20).

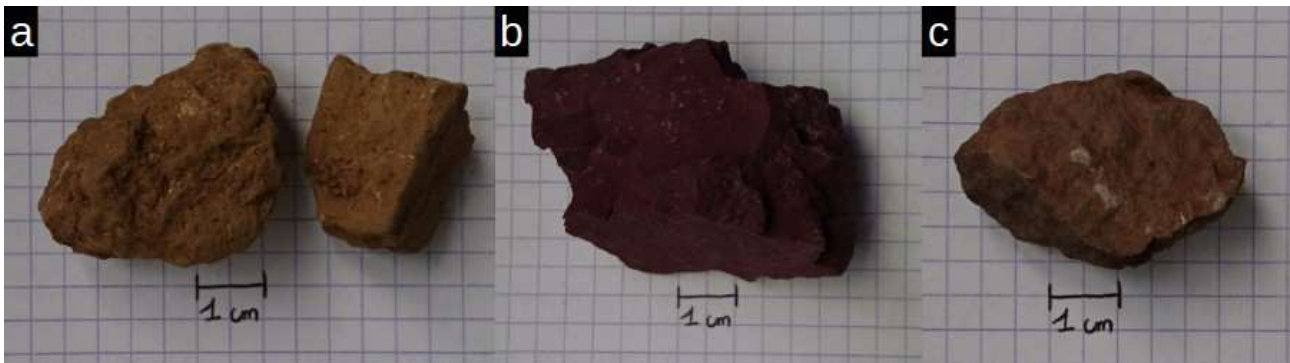


Figure 20 : Matières premières brutes Jish1 (a), Fuj1 (b) et Fuj2 (c)

La matière première nommée **Jish1** a été ramassée dans le village de Huángpǔ proche de Tóngchuān (ville-préfecture du district de Yàozhōu entre-autres) dans la province du Shǎnxī. Sous forme brute, il s'agit d'un loess déposé par le vent et compacté de couleur brun ocre légèrement friable (cf. Figure 20-a) [169]. Elle laisse un léger dépôt poudreux sur les doigts lorsqu'elle est manipulée à la main. Il s'agit de la matière première qui a été utilisée pour préparer la glaçure des échantillons de la série ZJ par Ren Shuanmin. Sa transformation de matière brute en glaçure crue est simple : une masse de roche brute est réduite en poudre dans un broyeur planétaire à boules contenant l'équivalent en masse d'eau et le double de boules d'agate de diamètre variant entre 4 cm et 10 cm pendant 6 heures. Une fois cette étape de broyage terminée, le mélange est filtré pour retirer les boules d'agate et les grains les plus gros non ou mal broyés. Une quantité d'eau est enfin ajoutée jusqu'à obtenir la texture désirée de manière empirique. Cette glaçure crue, nommée **ZJ-raw**, a été également étudiée et comparée avec Jish1.

La matière première nommée **Fuj1** a été ramassée sur le site archéologique de site de Lúhuāpíng (Fújiàn). Il s'agit d'une roche de couleur rouge cramoisi qui contient quelques inclusions noires (cf. Figure 20-b). Elle est dure, un peu friable et ne laisse pas de dépôt significatif sur les doigts lorsqu'elle est manipulée à la main. Elle ressemble beaucoup aux roches utilisées aujourd'hui par les artisans du Fújiàn qui produisent des céramiques à glaçure foncée [100,101].

La matière première nommée **Fuj2** est celle utilisée par Sūn Jiànxìng pour concevoir ses bols à glaçure noire aux reflets bleutés. Il s'agit d'une roche marron-gris avec quelques zones légèrement roses qui contient de nombreuses petites inclusions brillantes à l'œil (cf. Figure 20-c). Elle est légèrement friable et laisse un léger dépôt poudreux sur les doigts lorsqu'elle est manipulée à la main, en particulier au niveau des zones un peu plus roses. Cette roche a été ramassée sur la colline du Fújiàn qu'il a acquise après avoir exploré les possibilités et les roches des différentes collines alentours pour sa production artisanale. D'après les informations qu'il a échangées, il utilise cette roche brute, sans y ajouter d'additifs supplémentaires (ni colorant, ni fondant) [170].

Ces matières premières ont été étudiées crues d'une part et ont été réduites en poudre et chauffées en conditions de laboratoire contrôlées d'autre part pour comprendre de manière plus détaillée l'influence de certains des paramètres de cuissons sur le résultat final. Comme pour les créations modernes évoquées précédemment, leur comparaison avec les objets anciens et les créations permet de documenter leur influence.

5) Objets issus de collections muséales

Ce corpus d'échantillons et de matières premières a enfin été complété avec six bols, deux actuellement exposés au Musée Georges Labit et au Musée des Arts de la Table de l'Abbaye de Belleperche. Avant d'être prêtés au CEMES pour y être analysés, ces bols ont été préalablement examinés dans leur musée respectif avec une loupe binoculaire USB.

Les deux bols prêtés par le Musée Georges Labit pour une journée d'analyse sont un bol avec une glaçure « écaille de tortue » (No. 71-8-4) (cf. Figure 21-a) et un bol avec une glaçure « fourrure de lièvre » (No. 71-8-3) (cf. Figure 21-d) d'après l'ouvrage les documentant [88]. Le bol à glaçure « fourrure de lièvre » provient des fours de Jiàn (Fújiàn) et a une pâte brune assez granuleuse, visible au niveau du pied au-dessus duquel la glaçure a coulé pendant la cuisson. Celui à glaçure « écaille de tortue » provient des fours de Jízhōu (Jiāngxī) et est formé d'une pâte moins granuleuse et beaucoup plus claire. La glaçure de la surface extérieure a été appliquée sur la première moitié du bol uniquement.

Les quatre bols prêtés par le Musée des Arts de la Table de l'Abbaye de Belleperche pour une semaine d'analyse sont deux bols à glaçure noire avec une lèvre brune (Nos. AT-2010-67-302 et AT-2010-67-305) (cf. Figure 21-b et c), un bol à glaçure « fourrure de lièvre » (No. AT-2010-67-273) (cf. Figure 21-e) et un bol à glaçure brune avec quelques zones brunes plus claires réparties de manière hétérogène sur sa surface (No. AT-2010-67-256) (cf. Figure 21-f). Ces bols ont été datés du XII^e ou XIII^e siècle d'après le propriétaire qui les a achetés dans les environs de Nánjīng (Jiāngsū) et a légué sa collection au musée. Les deux bols noirs à la lèvre brune ont une pâte grise et l'un d'entre eux présente des concrétions marines (AT-2010-67-302), suggérant une conservation en milieu marin pendant une période relativement longue. Le bol à « fourrure de lièvre » est constitué d'une pâte de couleur chamois et celui à glaçure brune hétérogène d'une pâte beige-gris sur laquelle une inscription au pinceau a été apposée.

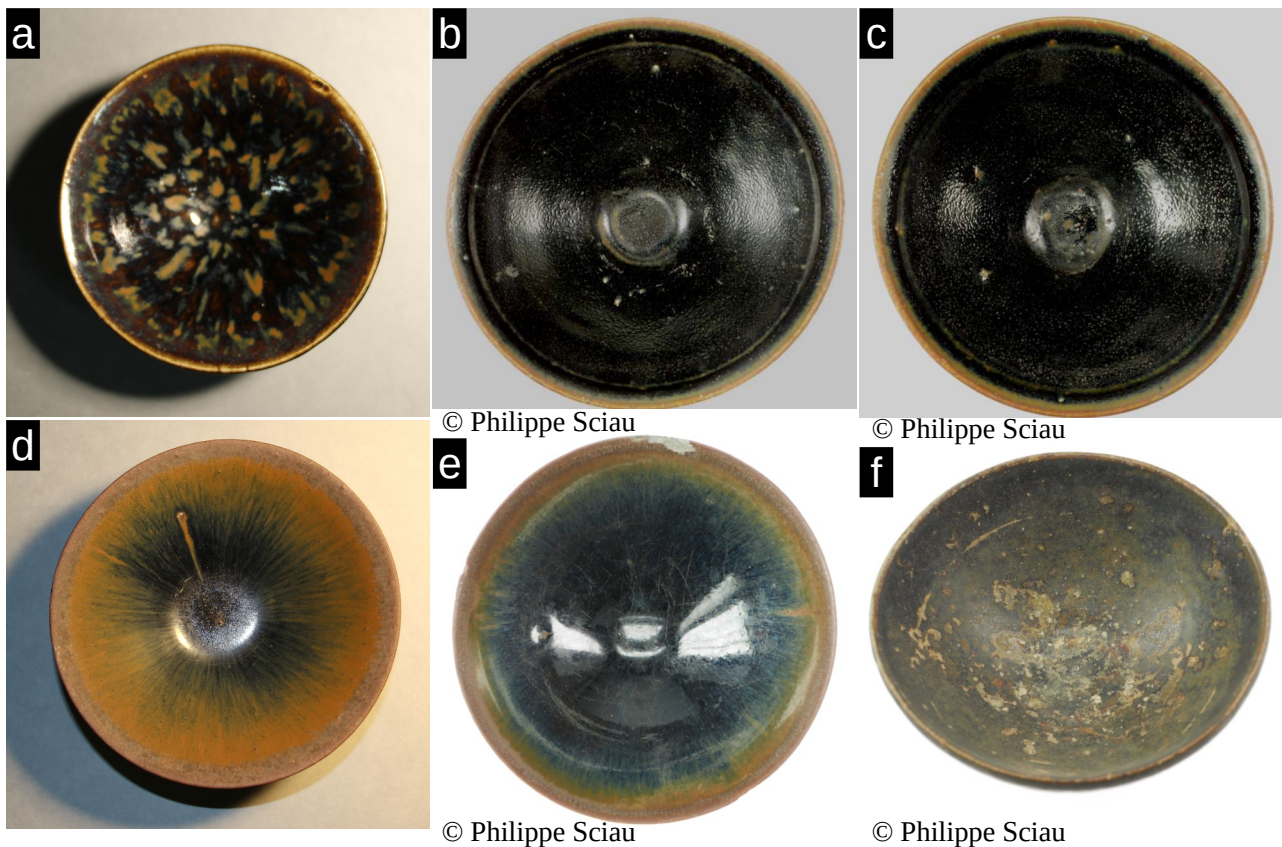


Figure 21 : Photographies des bols 71-8-4 (a), AT-2010-67-302 (b), AT-2010-67-305 (c), 71-8-3 (d), AT-2010-67-273 (e), AT-2010-67-256 (f)

6) Tableau récapitulatif et commentaires

Le Tableau 2 présenté à la page suivante récapitule les séries d'échantillons et d'objets disponibles pour ce travail. Un tableau plus exhaustif est disponible en Annexe 3 : Corpus détaillé des échantillons disponibles page 252, ainsi qu'une carte de la Chine indiquant la position des différents sites archéologiques d'où proviennent les tessons.

Ce corpus d'objets paraît sans doute relativement restreint et hétéroclite par rapport aux corpus habituellement étudiés dans le cadre d'études archéologiques de sites anciens. Il est important de rappeler ici que ce travail n'est pas une étude de site mais du matériau qui constitue les glaçures brunes et noires fabriquées par de nombreux artisans lors de la période Sòng sur la totalité du territoire occupé par cette dynastie.

Sa représentativité dans ce cadre sera discutée au regard des résultats obtenus suite aux analyses des différents échantillons disponibles présentées dans le Chapitre III : Analyses des tessons et objets archéologiques page 83.

Série	Échantillons	Provenance	Datation	Type
BG	BG-01 à -12	Huángpǔ (Shǎnxī)	Sòng du Nord	Archéo.
	BG-13 à -16	Yīngōu (Shǎnxī)	Sòng du Nord	Archéo.
LHP	LHP-01 à -03 + LuhuWu	Lúhuāpíng (Fújiàn)	Sòng	Archéo.
DLHM	DLHM-04, -06, -19, -36 et -40	Dàlùhòumén (Fújiàn)	Sòng	Archéo.
BZ	BZ-01 à -03	Tiānmù (Zhèjiāng)	Sòng	Archéo.
TZ	TZ-28	Dìngzhōu (Héběi)	Sòng	Archéo.
SUN	SUN-01 et -02	Sūn Jiànxìng	Moderne	Recréation
G	G-lisse et -plissé	Jean Girel	Moderne	Recréation
ZJ	ZJ-01 à -08	Ren Shuanmin	Moderne	Ep. tests
Mat. Ie	Jish1, ZJ-raw Fuj1 Fuj2	Tóngchuān (Shǎnxī) Lúhuāpíng (Fújiàn) Sūn Jiànxìng	/	Mat. Ie
Labit	71-8-3 71-8-4	Jiàn (Fújiàn) Jízōu (Jiāngxī)	Sòng	Objet
Bellperche	AT-2010-67-256, -273, -302 et -305	Incertaine	Sòng	Objet

Tableau 2 : Récapitulatif des échantillons disponibles

C – Stratégie d’analyse

1) Présentation générale de la stratégie

Le corpus varié, composé de tessons et objets anciens, de créations contemporaines et de matières premières, bien que limité, peut être tout à fait adapté à la problématique de cette étude selon la stratégie d’analyse. Celle choisie ici se base sur la combinaison de plusieurs techniques complémentaires d’imagerie, de spectroscopie et de diffraction. Elle permet de recueillir des informations de nature différente (structurales et chimiques principalement) dont l’association permet d’une part une caractérisation assez fine des matériaux constituant les différents échantillons. D’autre part, la diversité des techniques permet d’avoir une vision des matériaux à plusieurs échelles (de l’échelle macroscopique à l’échelle sub-micronique), ce qui facilite par exemple la discussion de la représentativité d’analyses très localisées.

Cependant, malgré les résultats qu’elle apporte, l’association systématique d’un grand nombre de techniques d’imagerie et d’analyse sur tous les échantillons du corpus est très chronophage et rarement pertinente. En effet, si l’aspect systématique est nécessaire pour caractériser un matériau A, il ne l’est pas forcément pour vérifier si un matériau B est le même que le matériau A. Il suffit de sélectionner les outils pertinents afin de faire une comparaison adaptée pour les interpréter de manière satisfaisante.

De plus, certains outils analytiques sont peu disponibles, longs et parfois coûteux à utiliser. Il convient ainsi de sélectionner un nombre très restreint d’échantillons dont les matériaux peuvent être jugés représentatifs pour les utiliser et d’extrapoler les résultats observés sur les autres échantillons proches.

2) Contraintes liées aux échantillons étudiés

Une céramique est un objet tridimensionnel, ce qui signifie qu'il possède à la fois des surfaces exposées et un intérieur qui ne l'est pas. De plus, comme évoqué dans l'introduction, elle est constituée de plusieurs divisions, la pâte et la glaçure, dont l'affleurement à la surface n'est pas le même (la pâte est souvent en-dessous la glaçure). Ces simples faits constituent une première contrainte assez forte pour l'étude des céramiques : étudie-t-on les céramiques par leur surface ou en regardant leur intérieur ? Ce questionnement est d'une importance primordiale, puisque qu'il a été montré que les glaçures brunes du type de celles étudiées ici sont stratifiées, avec une fine couche brune à la surface de la glaçure plus noire [123]. Il est d'autant plus crucial pour des objets de nature archéologique qui ont été exposés à des conditions environnementales qui pourraient favoriser la dégradation de leur surface, conduisant par exemple à des altérations physiques comme de la piqûration ou des altérations chimiques comme la cristallisation de nouvelles espèces [171–173]. Ces dégradations peuvent avoir une influence sur l'aspect visuel global de l'objet. Une étude récente sur des glaçures de Jiàn a par exemple montré que les irisations colorées observées sur deux tessons étaient dues à la corrosion de leur surface [174].

Ainsi, pour avoir une vision plus globale des objets, il est judicieux de combiner des analyses surfaciques, c'est-à-dire qui s'effectuent directement sur la surface exposée des échantillons, avec des analyses effectuées sur des sections transverses. Ces sections sont obtenues en découpant les échantillons et permettent de faire apparaître leur intérieur. Comme elles sont moins exposées aux conditions environnementales, elles sont beaucoup moins soumises aux dégradations. De plus, elles permettent de s'affranchir de l'influence de la couche superficielle brune de la glaçure pour en avoir une vision plus globale. A l'inverse, les études de surfaces permettent de faire ressortir l'influence de cette couche qui contribue aux propriétés visuelles des glaçures et constitue ainsi un point d'intérêt majeur à documenter.

Ensuite l'étude de fragments d'objets, qu'il s'agisse de tessons archéologiques ou d'échantillons prélevés à la scie, pose toujours la question de la représentativité du fragment par rapport à l'objet originel. Sur des tessons constituant la majeure partie de l'objet d'origine, cette représentativité est généralement facile à justifier. Quand il s'agit cependant de petits fragments prélevés sur des tessons, il faut s'assurer que les fragments possèdent bien toutes les spécificités du tesson d'origine, en particulier lorsque la glaçure possède plusieurs motifs. Dans ce cas, une sélection minutieuse des zones de prélèvement est nécessaire pour s'assurer d'appréhender les particularités de chaque échantillon. Pour les tessons BG-02 et BG-11 qui possèdent des zones brunes et des zones noires par exemple, les fragments découpés à l'Institute of Silicate Cultural Heritage l'ont été en veillant à effectivement contenir à la fois la glaçure brune et la glaçure noire.

Ces zones distinctes sont ensuite soumises aux mêmes analyses afin de pouvoir les comparer correctement. Quand cela est possible, la répétition d'analyses sur plusieurs points de la même zone peut également être effectuée afin de vérifier l'homogénéité de l'échantillon. Enfin il est possible avec certaines techniques d'élargir les points d'analyse, ce qui permet de moyenniser les résultats sur une plus grande surface pour gommer les spécificités les plus locales des échantillons.

L'étude d'objets exposés dans des collections muséales apporte également des contraintes spécifiques à la nature des objets. D'une part, leur accessibilité pour des expérimentations est

limitée dans le temps afin que les visiteurs puissent les observer dans leurs vitrines. Les expérimentations de longue durée sont rarement possibles sur ces objets. De plus, les expérimentations invasives, par exemple la découpe de sections transverses, sont à proscrire pour des raisons de perpétuation du patrimoine. C'est pourquoi le couplage avec l'étude de fragments est très importante : les résultats obtenus avec des analyses invasives sur eux peuvent parfois être extrapolés à ces objets pour les documenter de manière plus complète. Enfin ces objets ont des formes et des dimensions particulières qui demandent certaines adaptations à des techniques d'analyses développées pour des objets plus petits et de forme plus simple. Les zones d'intérêt ne sont ainsi généralement pas toutes accessibles facilement et demandent des dispositifs particuliers respectant à la fois les contraintes liées aux objets mais aussi aux outils analytiques.

3) Analyses effectuées

En accord avec la stratégie générale et les contraintes présentées ci-dessus, de nombreuses techniques d'imagerie et d'analyse ont été utilisées pour caractériser le corpus d'échantillons.

Avant toute analyse, les échantillons ont été observés visuellement afin de repérer leurs caractéristiques principales et d'identifier les différentes zones présentes sur chacun d'entre eux. Ceux qui possédaient des pollutions naturelles ou des traces de résine (dues au découpage) à leur surface ont été nettoyés.

L'observation optique des surfaces des différents échantillons du corpus a été effectuée avec différents outils (microscopes optiques, loupes binoculaires...) afin d'observer l'homogénéité des glaçures et de sélectionner des zones d'intérêt. Des analyses structurales de surface ont été effectuées de manière systématique sur les échantillons archéologiques, les échantillons de récréation et la plupart des échantillons de matière première chauffée par diffraction de rayons X (abrégé XRD pour X-Ray Diffraction). Celles-ci ont été complétées par spectroscopie Raman pour les échantillons de récréation et ceux de matière première chauffée, ainsi qu'une sélection d'échantillons archéologiques. De l'imagerie de surface a été également effectuée sur une sélection d'échantillons de tous types par microscopie électronique à balayage (abrégé en SEM pour Scanning Electron Microscopy), couplée avec de l'analyse dispersive en énergie (abrégé en EDS pour Energy Dispersive Spectroscopy) pour obtenir des cartographies chimiques des zones étudiées. Des analyses ont également été effectuées à l'Institute of Silicate Cultural Heritage avant ce travail, comme des mesures de composition chimique globale par spectrométrie de fluorescence des rayons X (abrégé en XRF pour X-Ray Fluorescence) et de la spectrophotométrie dans le domaine du visible qui sont discutées dans ce manuscrit.

Des sections transverses des échantillons archéologiques (sauf BG-13 à BG-16 qui n'ont été accessibles que tardivement pour être étudiés) ainsi que des échantillons de récréation ont été systématiquement préparées. Quelques sections d'échantillons de matière première chauffée ont également été préparées, afin de les comparer aux sections archéologiques pour observer l'influence des conditions avec lesquels ils ont été chauffés sur la glaçure. Comme les analyses de surfaces décrites ci-dessus, ces sections ont été systématiquement observées optiquement et analysées par XRD, notamment pour obtenir la composition structurale des pâtes. Ces sections ont également été étudiées par SEM-EDS pour observer en particulier la structure de l'interface entre la glaçure et la pâte et mesurer localement sa composition chimique. La composition chimique globale des glaçures

et des pâtes des échantillons archéologiques ainsi qu'une sélection d'échantillons de récréation a été mesurée par émission de rayons X induite par protons (abrégé en PIXE pour Particule Induced X-ray Emission). Quelques analyses par spectroscopie Raman ont également été effectuées ponctuellement sur la glaçure de quelques sections polies.

En outre, afin de caractériser finement et de comparer la microstructure de certains échantillons archéologiques, de récréation et de matière première chauffée, des lames minces ont été préparées par sonde ionique focalisée (abrégé en FIB pour Focused Ion Beam). Ces lames, d'une épaisseur de l'ordre de 100 nm pour permettre le passage des électrons au travers, ont été étudiées par microscopie électronique en transmission à balayage (abrégé en STEM pour Scanning Transmission Electron Microscopy) couplée à de l'EDS et de la cartographie d'orientation par diffraction électronique (abrégé en ACOM pour Automated Crystal Orientation Mapping) et par diffraction de Kikuchi en transmission (abrégé en TKD pour Transmission Kikuchi Diffraction).

Enfin les bols issus de collections de musée n'ont été analysés qu'avec des techniques non invasives et qui permettent l'analyse d'objets volumineux. Les glaçures des bols prêtés par le musée Georges Labit pour une journée ont été analysées par spectroscopie Raman. Ceux du musée des Arts de la Table qui étaient prêtés pour une semaine ont été également analysés par spectroscopie Raman mais aussi par XRD.

D – Conditions d'analyses et paramètres expérimentaux

1) Préparation et élaboration d'échantillons

*** Préparation de sections transverses**

Les sections transverses des échantillons de récréation de la série ZJ ainsi que des trois échantillons archéologiques DLHM-04, DLHM-06 et DLHM-19 ont été préparées à l'Institute of Silicate Cultural Heritage. Les autres ont été préparées au CEMES en suivant le protocole décrit ci-après.

Tout d'abord, des fragments d'échantillons ont été découpés à l'aide d'une scie à disque diamanté Isomet 11-1180 (Buehler). Ces fragments étaient disposés dans un étau métallique, calés dans du papier absorbant pour éviter que la compression ne les brise. Ce dernier est monté sur un bras mécanique pour laisser reposer l'échantillon sur la tranche du disque et permettre ainsi à la gravité d'abaisser l'échantillon au fur et à mesure de la découpe. Le disque de 12.7 cm de diamètre trempait dans un réservoir rempli d'eau pour lubrifier sa surface et éviter l'échauffement des échantillons.

Suite à cette étape, ces fragments ont été positionnés la section d'intérêt contre des socles d'enrobages en silicone dans un moule annulaire KM 2.0 de 25 mm de diamètre (Presi). Le moule a ensuite été rempli d'un mélange préalablement homogénéisé de résine d'enrobage MA2+ (Presi) et de durcisseur pour MA2+ (Presi) en proportion 10:1 en masse. Pour prévenir la formation de bulles sous et autour des sections lors du durcissement de la résine, une pression légère a été appliquée sur chaque fragment à l'aide d'une pince métallique pour chasser l'air piégé. La résine a été ensuite laissée à durcir pendant au moins 24 heures à température et atmosphère ambiantes.

Une fois la résine durcie, les enrobages ont été retirés de leurs socles pour être polis manuellement. Une première étape d'abrasion pour faire affleurer les sections à la surface de la résine est effectuée en frottant l'enrobage avec un mouvement de va-et-vient sur un papier abrasif à grains de carbure de silicium de 14 μm (G1200, Escil) imbibé d'eau pour lubrifier la surface des papiers et éviter l'échauffement des sections. Cette étape est suivie de deux autres étapes d'abrasion similaires avec des papiers à grains plus fins de 10 μm puis 5 μm (G2400 et G4000 respectivement, Escil) en tournant l'enrobage d'un angle de 90° pour retirer les marques de l'abrasion précédente. La progression de l'abrasion est suivie à l'aide d'une loupe binoculaire SZ30 (Olympus). Ces abrasions sont suivies de trois polissages successifs en frottant les enrobages avec un mouvement de "8" pendant une quinzaine de minutes contre des tissus sur lesquels un lubrifiant pour suspensions diamantées (LPS4 ROSE, Escil) et de la pâte contenant des micro-diamants de 3 μm , 1 μm et 0.25 μm de diamètre (3PS4-3MIC, 1PS4-1MIC et 1/4PS4S-1/4MIC respectivement, Escil) ont été préalablement appliqués. Une fois polis, les enrobages sont abondamment rincés à l'eau courante, puis à l'éthanol, pour retirer les traces de solvant ou de carbure de silicium et les micro-diamants.

*** Préparation d'échantillons métallisés**

Afin de réaliser des observations SEM dans de bonnes conditions, il est nécessaire que les échantillons soient des conducteurs pour prévenir l'accumulation de charge à leur surface. Pour cela, il faut recouvrir les zones à observer par une fine couche de métal ou de carbone.

Les sections transverses polies examinées par SEM ont simplement été soit carbonées avec un métalliseur à tresses EM ACE200 (Leica), soit métallisées avec une couche d'environ 8 nm de platine avec un métalliseur à plasma d'argon 308R (Cressington) équipé d'une microbalance à quartz pour suivre l'épaisseur du dépôt, puis disposées avec du scotch en aluminium pour faire le pont conducteur entre la surface métallisée des sections et la plateforme du microscope.

Les surfaces des différents échantillons ont, quant à elles, été découpées en deux temps, d'abord grossièrement à l'aide de la scie à disque diamanté Isomet 11-1180 (Buehler) comme décrit précédemment, puis affinées avec une scie à fil diamanté W3424 (Well) pour limiter leur épaisseur. Pour cela, les fragments découpés grossièrement étaient fixés sur un support de graphite à l'aide de résine solide puis disposés devant le fil qui trempait dans un réservoir rempli d'eau pour le lubrifier et éviter l'échauffement du fragment et du fil. Une fois ce découpage fin terminé, les surfaces ont été décollées puis lavées avec de l'acétone pour retirer les traces de graphite et de résine.

Après ce nettoyage, le fragment était déposé sur une plateforme métallique et fixé à l'aide d'une goutte de laque d'argent. Quelques ponts conducteurs entre la plateforme et la surface à analyser étaient effectués avec de la laque d'argent à l'aide d'un cil de porc. Ces préparations étaient ensuite métallisées au carbone ou au platine de la même manière que les sections.

*** Préparation de lames minces par FIB**

Des lames minces adaptées à l'étude par microscopie électronique en transmission ont été préparées à partir des surfaces métallisées d'échantillons à l'aide d'un SEM-FIB Helios NanoLab 600i (Thermofisher) équipée d'une source ionique au gallium. Elles ont été préparées en suivant la méthode dite du "lift out" [175,176].

Cette dernière consiste à protéger la surface de la zone d'intérêt à l'aide d'un dépôt de platine assez épais (de l'ordre de 1 à 2 μm) effectué en 2 temps d'abord à l'aide du faisceau d'électrons à 2 kV et 0,69 nA, puis à l'aide du faisceau d'ions à 30 kV et 80 pA (cf. Figure 22-a). Deux puits profonds sont ensuite creusés de part et d'autre du dépôt de platine à l'aide du faisceau d'ions d'abord à 30 kV et 9,3 nA pour creuser rapidement puis à 2,5 nA pour redresser les deux côtés de la lame (cf. Figure 22-b). La lame est ensuite extraite de ces puits grâce à un micromanipulateur et une découpe avec le faisceau d'ions à 30 kV et 2,5 nA et fixée « en drapeau » sur une grille de cuivre (cf. Figure 22-c). Elle est ensuite affinée avec le faisceau d'ions en diminuant successivement à partir de 30 kV et 80 pA sa tension et son courant jusqu'à obtenir l'épaisseur désirée, soit de l'ordre de 100 nm pour cette étude (cf. Figure 22-d).

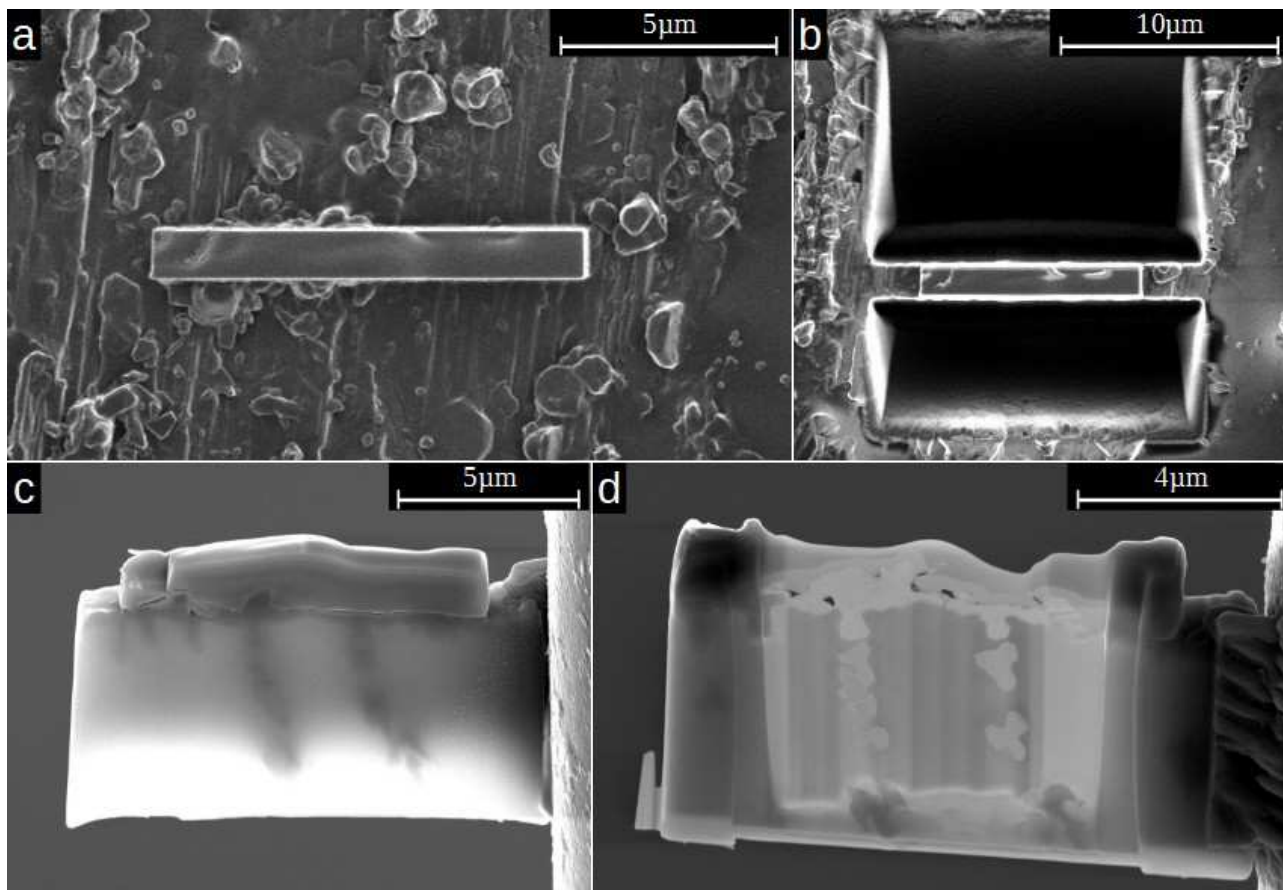


Figure 22 : Images FIB (30 kV, 80 pA) du dépôt de platine (a), des puits creusés autour de la lame (b) et images SEM (SE, 18 kV, grossissements $\times 10000$ et $\times 15000$) de la lame extraite avant (c) et après affinage ionique (d)

* **Élaboration d'échantillons de matière première chauffée**

Afin de documenter les effets de divers paramètres de cuisson sur les glaçures, plusieurs séries d'échantillons ont été élaborées à partir des matières premières crues présentées dans le corpus.

Pour commencer, les matières premières disponibles (Jish1, Fuj1 et Fuj2) ont été réduites en poudre pour être manipulées aisément. Ces roches ont d'abord été fracturées afin d'obtenir des éclats d'une taille inférieure au centimètre à l'aide d'un marteau et entre deux pièces de tungstène pour prévenir les potentielles pollutions dues à l'acier du marteau. Le tungstène n'y étant pas présent (du moins en quantité inférieure aux limites de détection des outils analytiques utilisés), les

éventuelles pollutions seraient faciles à repérer. Ces éclats ont ensuite été réduits en des poudres fines à l'aide d'un mortier et d'un pilon en agate, qui ont été étudiées crues et cuites.

Les premiers échantillons de matières premières chauffées ont été réalisés dans un four tubulaire en mullite (Nabertherm) à Chimie ParisTech (Université Paris Sciences et Lettres, 75005 Paris, France) dans le cadre d'une mission effectuée entre le 14/09/2020 et le 24/09/2020.

Les poudres sèches ont d'abord été placées dans des creusets en platine et cuites directement avec un cycle thermique proche de ceux utilisés pour produire les échantillons de recreations de la série ZJ. Cependant, leur adhérence au platine rendait les échantillons difficiles à sortir des creusets sans les endommager, ce qui rendait leur étude complexe.

Pour prévenir l'utilisation de creusets en platine, les poudres sèches ont été déposées à l'aide d'une spatule sur des médaillons de pâte à porcelaine commerciale d'environ 2,5 cm de diamètre et 1 cm d'épaisseur. Ces médaillons ont ensuite été déposés sur une pièce de matériau réfractaire pour être placés dans le four et y subir les cycles thermiques quasiment identiques à celui de la série ZJ (cf. Figure 23). La seule différence entre ce cycle thermique et celui de la série ZJ est l'absence du palier à 1230°C, décidée car l'élévation de température pendant le segment d est très lente, à 0,4°C.min⁻¹, ce qui correspond à 12°C en 30 minutes (la durée du palier) ce qui est proche de l'erreur du four à ces températures.

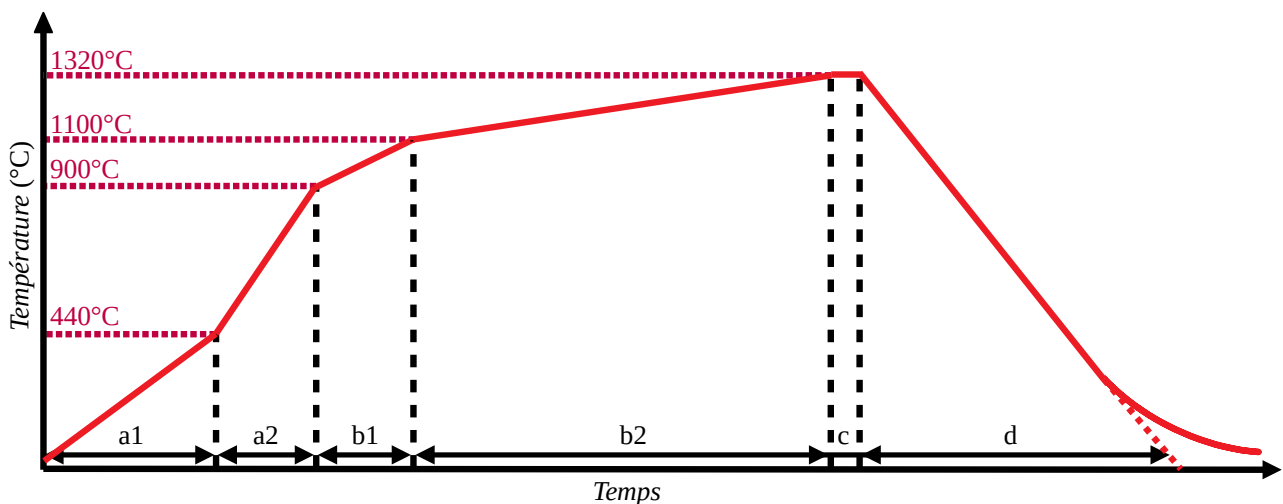


Figure 23 : Cycles thermiques de la série CP appliqués aux échantillons de matière première

Pour vérifier l'influence de la durée totale de cuisson, deux cycles thermiques ont été réalisés en faisant varier les durées de chaque segment du cycle thermique. La première a été réalisée en doublant approximativement les temps de chaque étape du cycle thermique traditionnel, la seconde en reprenant ses durées. Ces deux cycles ont été effectués avec un piège à oxygène composé de tournures de zirconium placées dans un creuset en alumine disposé dans le four à proximité des échantillons afin d'avoir une atmosphère faiblement oxydante, en accord avec les conditions de refroidissement du cycle traditionnel. Ces deux cycles sont numérotés respectivement **CP-C1** et **CP-C2**. Ensuite, afin de vérifier l'influence de l'atmosphère de la chambre du four au cours de la cuisson, deux cycles supplémentaires ont été effectués : un sans piège à oxygène et un autre avec le même type de piège mais en ajoutant un flux continu d'argon pour obtenir respectivement une

atmosphère oxydante et neutre. Ils sont numérotés respectivement **CP-C3** et **CP-C4**. Les durées des différents segments de ces quatre cycles thermiques sont indiquées dans le Tableau 3.

No cycle	Segment a1	Segment a2	Segment b1	Segment b2	Segment c	Segment d
CP-C1	6 h	4 h	4 h	18 h	1 h	12 h
CP-C2	3,5 h	2 h	1,8 h	9,2 h	0,5 h	5,8 h
CP-C3	3,5 h	2 h	1,8 h	9,2 h	0,5 h	5,8 h
CP-C4	3,5 h	2 h	1,8 h	9,2 h	0,5 h	5,8 h

Tableau 3 : Durées des segments des cycles thermiques de la série CP

Les échantillons obtenus avec ces cycles thermiques sont désignés par des noms de type T-X, avec « T » correspondant au nom de la matière première utilisée et « X » au numéro du cycle thermique : par exemple l'échantillon de matière Jish1 cuite avec le cycle thermique CP-C2 sera noté Jish1-CP-C2.

Pour documenter l'influence d'autres paramètres de cuisson, en l'occurrence de l'ajout de calcium à la matière première, la température maximale atteinte lors du cycle thermique, la vitesse de refroidissement et du dégourdi préliminaire de la pâte, de nouveaux échantillons ont été élaborés au CEMES entre le 03 et le 28/03/2022. Pour vérifier l'influence de l'ajout de calcium, la glaçure crue ZJ-raw a été mélangée avec du carbonate de calcium (CaCO_3) de pureté de laboratoire (Aldrich Chemical Company) en proportion 20:1 en masse (soit 5%w). Ce mélange et la matière première crue ont été déposés sur des médaillons de pâte à porcelaine commerciale, éventuellement dégourdis à 600°C pendant 10h, 900°C pendant 3h ou 900°C pendant 10h. Les dégourdis, ainsi que les cycles thermiques ont été réalisés à l'aide d'un four à moufle RHF 1500 (Carbolite). Ces cycles, numérotés de **CEMES-C1** à **CEMES-C7**, ont été effectués sous atmosphère ambiante. Ils sont un peu simplifiés par rapport à ceux effectués à Chimie ParisTech (cf. Figure 24) : la montée en température s'effectue en deux segments a et b, respectivement équivalents des segments a1 + a2 et b1 + b2 des cycles thermiques de la série CP.

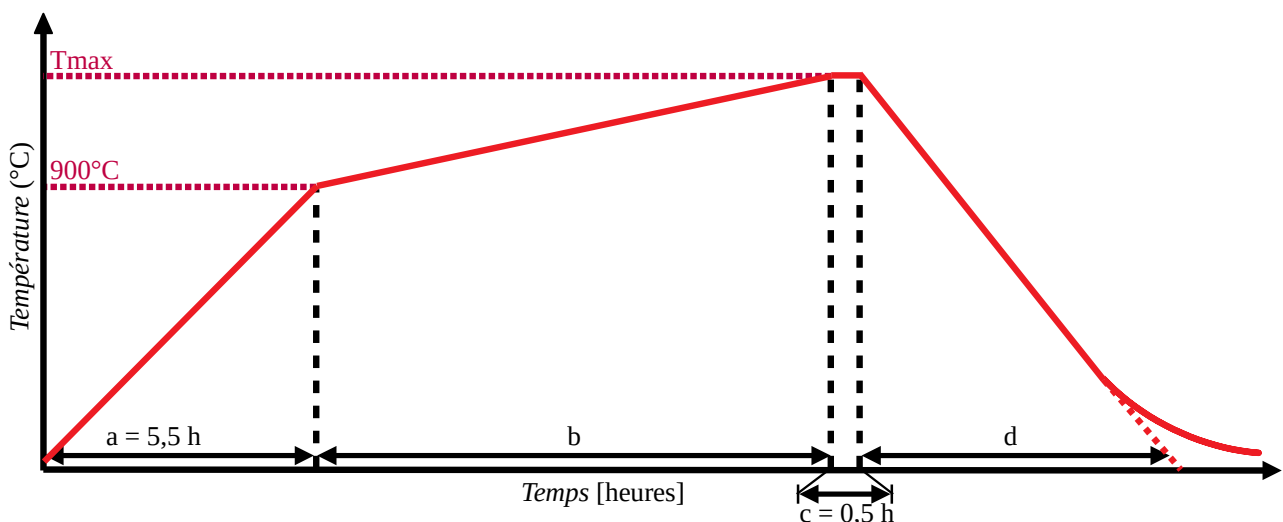


Figure 24 : Cycles thermiques de la série CEMES appliqués aux échantillons de matière première

La durée du segment a été fixée à 5 heures et 30 minutes et celle du segment c (palier à Tmax) à 30 minutes. La durée du segment b varie en fonction de la température maximale atteinte, l'idée

étant de s'assurer d'avoir une vitesse de montée en température comparable entre les différents cycles, d'environ environ 0,64°C/min. Les durées des segments b et d ainsi que la température maximale Tmax atteinte lors de ces cycles sont indiquées dans le Tableau 4.

No cycle	Segment b	Segment d	Température Tmax
CEMES-C1	11 h	6 h	1320°C
CEMES-C2	11 h	9 h	1320°C
CEMES-C3	11 h	12 h	1320°C
CEMES-C4	8,4 h	6 h	1220°C
CEMES-C5	9,7 h	6 h	1270°C
CEMES-C6	12,3 h	6 h	1370°C
CEMES-C7	11h	6h	1320°C

Tableau 4 : Durées des segments et températures maximales des cycles de la série CEMES

2) Techniques analytiques et d'imagerie

* *Imageries et microscopies optiques*

Les observations préliminaires à la loupe binoculaire ont été effectuées avec un équipement SZ30 (Olympus). Cet outil n'étant pas équipé de caméra permettant d'enregistrer les observations, un second examen a posteriori a été effectué avec une loupe binoculaire USB AM4515ZT-Edge (Dino-Lite Digital Microscope) qui permettait l'enregistrement d'images à l'aide du logiciel associé DinoCapture 2.0. Toutes les images des surfaces des échantillons archéologiques ont été effectuées avec un grossissement de x100. Afin de pouvoir comparer qualitativement les couleurs, le niveau du blanc a été effectué avec une feuille de papier vierge entre les différentes séances de mesure et l'obturateur a été fixé avec une exposition de 1/30s. L'examen préalable de la surface des objets des collections des musées Georges Labit et des Arts de la Table a également été réalisé à l'aide de cet outil maniable qui permet de s'adapter aux surfaces non planes avec des grossissements de x60 et x180 environ.

Les observations en microscopie optique de la surface des échantillons de récréation et d'une sélection d'échantillons archéologiques ont été effectuées avec un microscope Eclipse LV100ND (Nikon) équipé d'une caméra DS-Ri2 (Nikon). Les images ont été prises avec l'objectif x20 pour un grossissement total de x200. De même que pour les images enregistrées avec la loupe binoculaire USB, les images de microscopie optique ont été enregistrées avec une exposition et une intensité d'éclairage fixées.

Les observations en microscopie optique des échantillons de matière première chauffée élaborés à Chimie ParisTech ont été effectuées à l'aide d'un microscope numérique VHX-5000 (Keyence). Cet instrument permet l'acquisition d'images de surfaces non planes grâce à un système de superposition et reconstruction d'images prises à différentes distances focales qui a été utilisé lorsque les surfaces des glaçures étaient significativement convexes. Les images ont été enregistrées avec des grossissements de x500, x1000 et x3000.

* Diffraction des rayons X conventionnelle (XRD)

Les diffractogrammes XRD ont été enregistrés avec un diffractomètre D8 Discover (Brüker) équipé d'une micro-source à anode de cobalt ($i\mu\text{S}$ 2.0, Incoatec) et d'un détecteur 2D (Vantec 500, Brüker) placé à 200 mm de l'échantillon pour mesurer une amplitude d'angle de l'ordre de 30° . La largeur du faisceau incident contrôlée par différents collimateurs de diamètres variables a été fixée à 1 mm pour les analyses (sauf mention contraire).

Les analyses des glaçures archéologiques ont été effectuées par la surface des échantillons avec un programme allant de 20° à 80° (en position du détecteur, ce qui correspond effectivement à environ 10° à 100°). Cinq pas de 2 heures chacun et de 15° d'amplitude angulaire ont été effectués afin d'assurer suffisamment de recouvrement entre deux images consécutives pour effectuer un raccord de bonne qualité. Les diffractogrammes des échantillons de récréation et des matières premières chauffées ont été enregistrés avec un programme de cinq pas également, mais de 1 heure chacun. Les analyses des pâtes ont quant à elles été réalisées sur les sections transverses enrobées avec un programme de six pas de 15° entre 20° et 95° et de 30 minutes chacun. Les profils en profondeur des échantillons archéologiques ont également été effectués sur les sections transverses avec un programme de deux pas à 20° et 35° de 30 minutes chacun. Pour ces derniers, un collimateur de $500\ \mu\text{m}$ a été sélectionné et les analyses ont été enregistrées tous les $250\ \mu\text{m}$ entre chaque zone afin d'avoir un profil le plus représentatif de l'échantillon possible.

Préalablement à leurs analyses, les matières premières crues ont été broyées dans un mortier en agate pour obtenir une poudre fine. Elles ont ensuite été placées dans un porte échantillon en plastique et leur surface a été aplanie à l'aide d'une lame de verre. Elles ont été analysées avec un programme de cinq pas de 15° entre 20° et 80° de 30 minutes chacun.

Les images obtenues ont été fusionnées avec le logiciel DIFFRAC.EVA (Brüker) et un diagramme à une dimension a été obtenu par intégration angulaire du nombre de coups sur les images (cf. Figure 25).

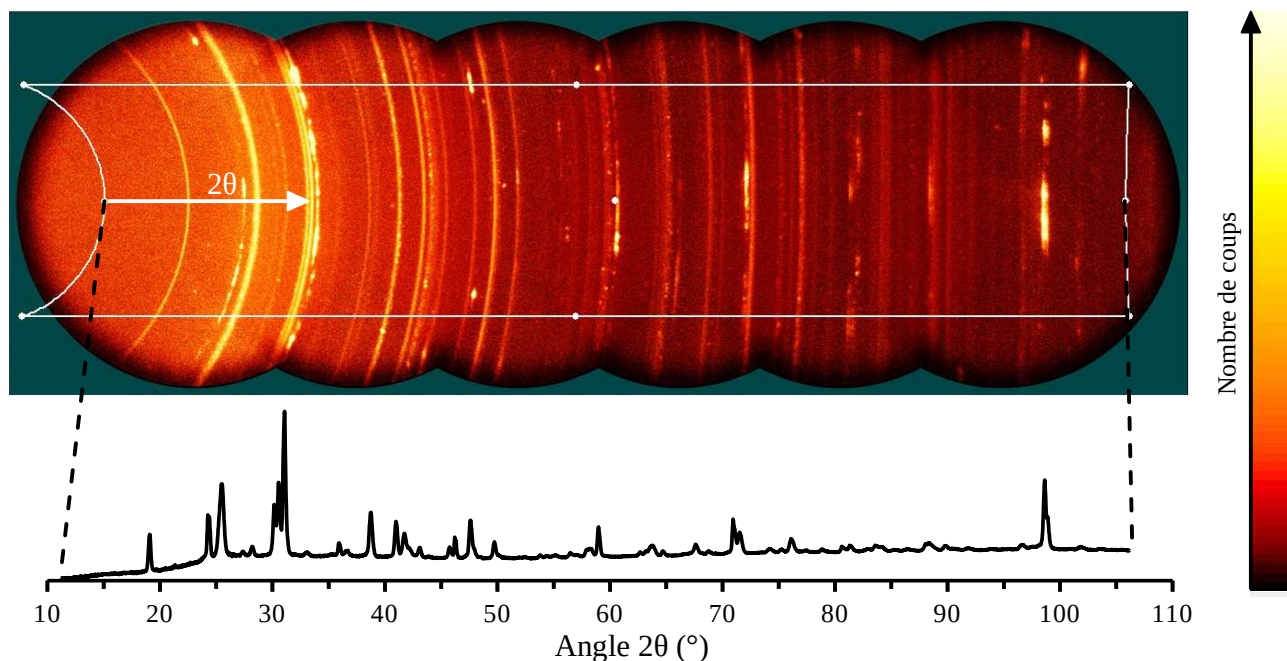


Figure 25 : Images 2D enregistrées sur la pâte de LHP-02 et diffractogramme 1D associé

L'identification des phases a été effectuée à partir de ces diagrammes avec DIFFRAC.EVA en utilisant la base de données ICDD. La détermination des paramètres de maille des différentes espèces ont été obtenus par la méthode de Rietveld [177,178] en utilisant le logiciel Topas (Brüker). D'autres affinements par la méthode de Rietveld ont été effectués avec le logiciel Fullprof [179].

*** Diffraction des rayons X *in-operando* (XRD *in-operando*)**

Les analyses XRD *in-operando* ont été réalisées sur la ligne ID22 de l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble) dans le cadre d'une mission effectuée entre le 03 et le 09/03/2021. Les matières premières crues ont été mises dans des capillaires en quartz qui étaient en rotation au cours des analyses pour des raisons d'homogénéité. Un four à trois lampes a été utilisé pour les chauffer, sur lequel la puissance pouvait être réglée entre 0 et 270 W. La température dans le capillaire a été déterminée à l'aide d'un standard de poudre de platine métallique mélangé à la matière première en proportion de l'ordre de 10:1 volumique (cf. Chapitre IV, C, 1) Détermination de la température du milieu réactionnel page 139). Les diffractogrammes ont été enregistrés à la longueur d'onde de 0.354296 Å, à puissance de chauffe constante avec une durée d'acquisition de 20 minutes. Entre 3 et 5 acquisitions ont été effectuées pour chaque diagramme afin de minimiser l'influence des variations de température pendant les acquisitions. Les changements de puissance (chauffe et refroidissement) étaient effectués entre deux acquisitions.

*** Spectroscopie Raman**

Les spectres Raman ont été enregistrés sur tous les échantillons avec un spectromètre XploRA (Horiba) équipé d'un détecteur CCD Peltier. Ils ont été acquis pendant 2x60 s avec un faisceau monochromatique à 532 nm généré par un laser DPSS (Diode Pumped Solid State) Nd-YAG, un réseau de 1800 traits/mm, une fente et un trou confocal de 100 µm chacun à température ambiante avec un objectif x100 ou x50 quand la géométrie de l'échantillon ne permettait pas d'utiliser l'objectif x100. Les résultats ont été traités avec le logiciel LabSpec v6.4.4.15 (Horiba).

Les analyses des objets des collections de musées ont été réalisées avec un spectromètre T64000 (Jobin-Yvon/Horiba) équipé d'un laser Ar Innova I90C-5 (Coherent) réglé sur la raie d'émission à 528,7 nm et en configuration triple monochromateur pour éliminer la raie Rayleigh. Les spectres ont été acquis pendant 2x60 s par fenêtre (trois fenêtres par spectre) avec un réseau de 2400 traits/mm, une fente et un trou confocal de 100 µm chacun à température ambiante avec un objectif x100. Afin de positionner facilement les bols sous l'objectif sans les endommager, ils ont été disposés dans un récipient en plastique et immergés dans du riz, ce qui permettait de les maintenir dans la position voulue de manière stable sans abraser leur surface. Les spectres obtenus ont été traités avec le logiciel LabSpec v5.93.20 (Horiba). Quelques spectres ont également été enregistrés dans une configuration similaire avec un laser à 458 nm et traités de la même manière.

Les spectres obtenus ont été identifiés par comparaison avec des spectres disponibles sur la base de donnée RRUFF ou présentés dans des études publiées dans la littérature dans le cas où ils n'existaient pas sur RRUFF.

*** Microscopie électronique à balayage et caractérisations associées (SEM-EDS-TKD)**

L'imagerie SEM et les analyses EDS et TKD ont été effectuées dans un microscope à deux colonnes Helios NanoLab 600i (Thermofisher), sur des échantillons métallisés pour le SEM-EDS et

les lames minces pour le TKD. L'imagerie des surfaces et des sections transverses a été effectuée avec un détecteur d'électrons rétro-diffusés pour favoriser le contraste chimique et un détecteur d'électrons secondaires pour favoriser le contraste topologique des surfaces des objets avec une distance de travail de l'ordre de 5 mm. Les zones ont été imagées à deux tensions : 5 kV et 18 kV afin de sonder différentes profondeurs avec le faisceau électronique, respectivement de l'ordre de 400 nm et 4 μm d'après des simulations effectuées avec le logiciel Casino v2.48 en utilisant une composition de glaçure proche de celle mesurée sur les échantillons.

Les analyses de composition chimique par EDS ont été réalisées avec un détecteur Xmax 150 mm² (Oxford Instruments) et les analyses cristallographiques par TKD avec un détecteur EBSD NORDLYS II, tous deux installés sur le Helios NanoLab 600i (ThermoFisher). Les spectres et cartographies EDS ont été acquis avec une tension de 18 kV un courant de 0,69 nA et une distance de travail de 6,5 mm ce qui résultait en un temps mort de l'ordre de 25 %. Ils ont été traités avec le logiciel AZtec v3.3 (Oxford Instruments). Les clichés TKD ont été acquis avec une tension de 30 kV, un courant à 11 nA et une distance de travail de 4 mm. Ils ont été attribués également avec AZtec v3.3 en utilisant 12 bandes et une résolution de l'espace de Hough de 90 à partir de fichiers CIF issus des bases de données ICDD et COD convertis au format adéquat à l'aide du logiciel Twist v5.12.63.0 (Oxford Instruments). Les cartographies TKD ont ensuite été représentées à l'aide des logiciels Channel5 et Tango v5.12.63.0 (Oxford Instruments). Ces logiciels ont également permis de nettoyer les cartographies, en supprimant les pixels isolés mal-attribués et en complétant les pixels vides dans les cristaux (avec un nombre de voisin minimal de 6 pixels). Les orientations ont ensuite été étudiées et les figures de pôles tracées à l'aide des logiciels Stereoprog et Misorientation de la suite Pycotem [180] et les plans atomiques représentés à l'aide du logiciel Vesta v3.5.7 [181].

*** Microscopie électronique en transmission et caractérisations associées (STEM-EDS-ACOM)**

L'imagerie et les analyses TEM ont été effectuées à l'aide d'un microscope CM20 FEG (Philips) équipée d'un système STEM nécessaire pour réaliser les expériences d'EDS et d'ACOM. Les expériences ont été réalisées avec des électrons accélérés à 200 kV et des grossissements entre x50000 et x150000. Les cartographies EDS ont été enregistrées à l'aide d'un détecteur SDD (Brücker) d'une résolution de 127 eV (raie du Mn) et traitées à l'aide du logiciel Esprit v1.9 (Brücker). Les éléments Pt (dû au dépôt de protection), Ga (dû à la préparation par FIB), Cu (dû à la grille sur laquelle la lame est fixée) et Co (dû aux lentilles du microscope) ont été pris en compte et déconvolués dans la détermination des compositions associées aux spectres EDS. Les cartographies ACOM ont été acquises à l'aide d'un détecteur DigiSTAR P1000 (NanoMEGAS) et exploitées à l'aide de la suite de logiciels ASTAR v2.08 (DiffGen, Index et Mapviewer) (NanoMEGAS). DiffGen a été utilisé pour générer des diagrammes de diffraction électronique à partir de fichiers CIF issus des bases de données ICDD et COD, Index pour les comparer avec les diagrammes expérimentaux et en déduire les phases et les orientations et Mapviewer pour l'affichage et la mise en forme des données en cartographie [182].

*** Émission de rayons X induite par proton (PIXE)**

Les compositions chimiques ont été mesurées par PIXE à l'accélérateur AGLAÉ (Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire, C2RMF, Paris) dans le cadre de deux missions effectuées entre les 10 et 14/02/2020 et entre les 26 et 30/07/2021. Ces analyses ont été effectuées sur des

zones larges des sections transverses (de l'ordre du mm²) afin de prévenir les variations locales avec des protons accélérés à une énergie de 3 MeV. Les spectres PIXE ont été enregistrés avec une combinaison de trois détecteurs de photons de haute énergie (abrégé en HE) et un détecteur de photons de basse énergie (abrégé en BE) tous recouverts de filtres de 50 µm d'aluminium.

Les spectres ont été traités avec le logiciel GUPIX. Le calibrage des épaisseurs d'air a été effectué à l'aide d'un standard de diorite (Dr-N) puis vérifié à l'aide de standards de verre (MaN, Brilla et BrillB). La normalisation des concentrations calculées entre les spectres acquis par les détecteurs HE et BE a été réalisée avec le logiciel TRAUIXE [183] en utilisant le fer comme élément pivot, car il est détecté par les deux types de détecteurs et présent dans les échantillons en quantité assez importante. Les cartographies ont été tracées et des zones spécifiques ont été sélectionnées pour analyse plus fine à l'aide du logiciel new-AGLAEMAP. Les profils de composition ont été effectués par binning des pixels de chaque ligne puis traitement des spectres associés par TRAUIXE. Lorsque les surfaces des échantillons n'étaient pas parfaitement parallèles aux bords de la cartographie, elles ont été préalablement redressées à l'aide d'un logiciel maison développé par Raphaël Moreau.

*** Spectrométrie par fluorescence des rayons X (XRF)**

Quelques analyses élémentaires préalablement réalisées à l'Institute of Silicate Cultural Heritage par XRF sont présentées dans ce travail, en particulier par comparaison avec les analyses réalisées par PIXE. Elles ont été effectuées à l'aide d'un spectromètre HORIBA XGT-7200V à 50 kV et 1 mA, avec un faisceau de 1,2 mm de diamètre. Dans ces conditions opératoires, la résolution énergétique a été estimée à 138,3 eV sur la raie K α du manganèse. Trois spectres ont été enregistrés sur chaque zone de chaque échantillon pendant une durée de 120 s directement à leur surface. Les spectres ont été traités par les équipes de l'Institute of Silicate Cultural Heritage à l'aide du logiciel XGT-7200 associé au spectromètre.

Chapitre III : Analyses des tessons et objets archéologiques

A – Caractérisation des pâtes

1) Observations optiques

Les observations à l'échelle macroscopique des pâtes des différents échantillons du corpus ont été complétées par des observations à la loupe binoculaire des sections transverses polies.

Les pâtes des échantillons de la série BG sont relativement peu granuleuses et présentent une porosité assez faible (avec des pores de diamètre inférieur ou égaux à 60 μm) (cf. Figure 26).

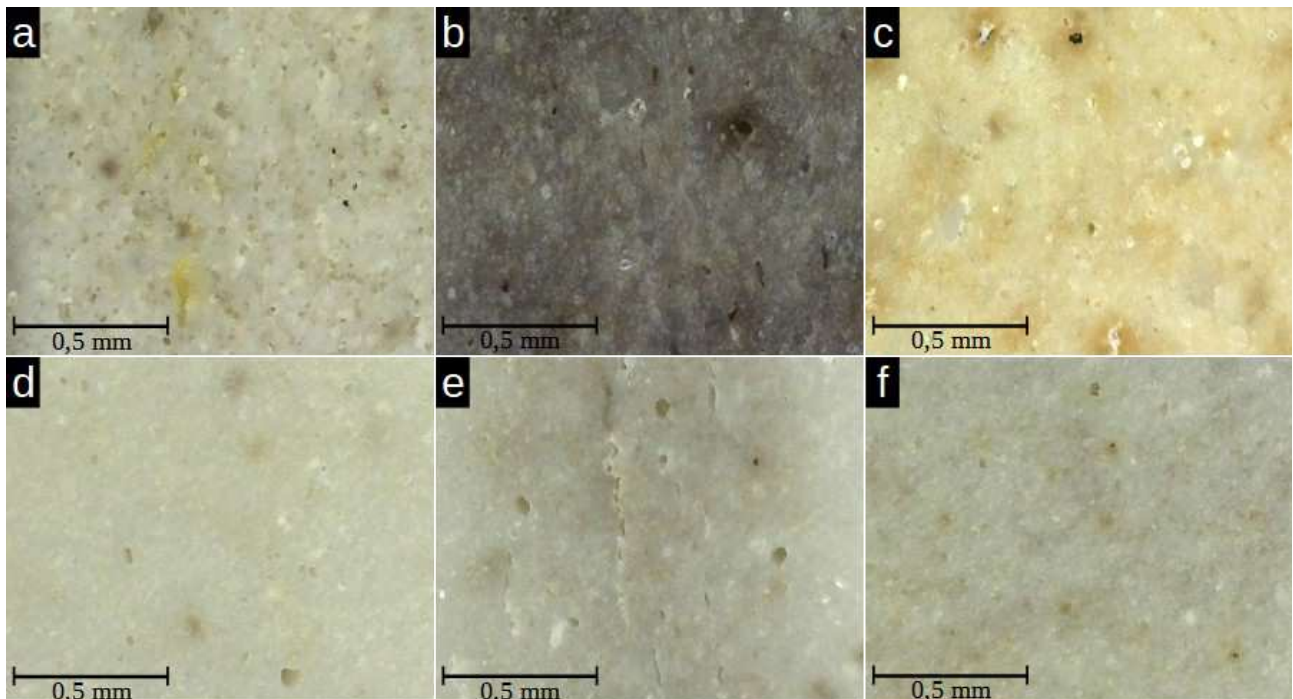


Figure 26 : Images optiques (grossissement x100) des pâtes de BG-01 (a), BG-03 (b), BG-04 (c), BG-07 (d), BG-10 (e) et BG-12 (f)

La densité de pores varie en fonction des échantillons : certains comme BG-01 présentent une densité de pores relativement élevée alors que d'autres comme BG-07 ou BG-12 ont une porosité plus faible. Certains présentent également des micro-fissures au centre de la pâte parallèles à la surface de l'objet, comme BG-10. Leur aspect rappelle les fissures dues à des contraintes internes observées lors du refroidissement d'objets.

La couleur des pâtes des échantillons de cette série est gris clair pour la plupart d'entre eux, sauf BG-03 qui a une pâte gris foncé, BG-04 qui est constitué d'une pâte beige clair avec une couleur assez hétérogène et BG-05 qui est formé d'une pâte grise. De plus, plusieurs échantillons présentent une couche plus claire d'épaisseur variable à l'interface entre la pâte et la glaçure. Il s'agit probablement d'un engobe blanc à base de kaolin utilisé pour faire paraître la pâte d'une qualité

supérieure¹⁴, ce qui était un procédé assez commun dans les fours de Yàozhōu, documenté par exemple sur leur céladons [184].

Les pâtes des échantillons des autres séries (LHP, DLHM, BZ et TZ) peuvent être divisées en deux catégories : des pâtes foncées et grossières (LHP, DLHM et BZ-01) et des pâtes fines et blanches (BZ-02, BZ03 et TZ-28) (cf. Figure 27).

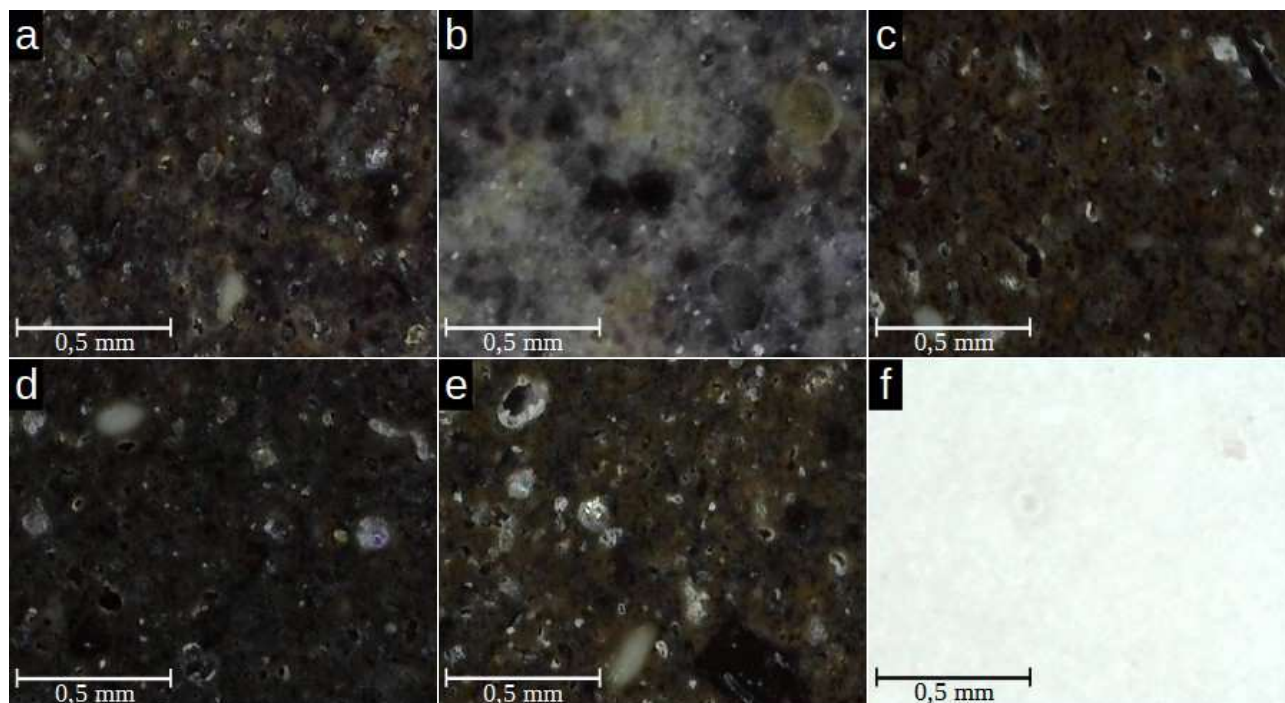


Figure 27 : Images optiques (grossissement $\times 100$) des pâte de DLHM-06 (a), DLHM-19 (b), BZ-01 (c), LHP-01 (d), LuhūWū (e) et BZ-03 (f)

Les échantillons possédant une pâte grossière ont tous une pâte noire ou brune très sombre, à l'exception de DLHM-19 qui est constitué d'une pâte de couleur hétérogène, avec des zones gris foncé et d'autres plus claires, légèrement jaunâtres. Les pâtes sombres contiennent de grosses inclusions blanches pouvant dépasser les 150 μm de diamètre. La densité de porosité est un peu plus élevée que celle des échantillons de la série BG en moyenne, avec des tailles de pores hétérogènes pouvant ponctuellement atteindre jusqu'à près de 200 μm . Certains échantillons présentent également des microfissures parallèles à la surface de l'objet, comme BZ-01 par exemple.

Les échantillons BZ-02, BZ03 et TZ-28 ont quant à eux des pâtes denses et assez vitrifiées avec peu de porosité. Elle contiennent très peu voire pas d'inclusions.

2) Caractérisation chimique

Afin de documenter les pâtes des échantillons de chaque série de manière plus quantitative, des analyses chimiques ont été effectuées sur les pâtes des différents échantillons. Ces analyses ont été réalisées de manière systématique par PIXE sur toutes les sections transverses. Les résultats de

14- Les pâtes blanches et fines sont assez peu répandues à l'époque de la dynastie Sòng. Ces argiles sont donc utilisées comme engobe appliqué sur une pâte plus grossière pour lui donner un aspect plus fin.

ces analyses sont disponibles dans le tableau présenté en Annexe 4 : Compositions élémentaires mesurées par PIXE, Tableau 19 page 260.

Les proportions en oxydes majeurs (SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3) permettent d'établir deux groupes d'échantillons cohérents : la production des fours de Yàozhōu d'un côté (ovale orange, associé à la série BG) et celle des différents fours du Fújiàn de l'autre (ovale noir, associé aux séries LHP et DLHM) (cf. Figure 28).

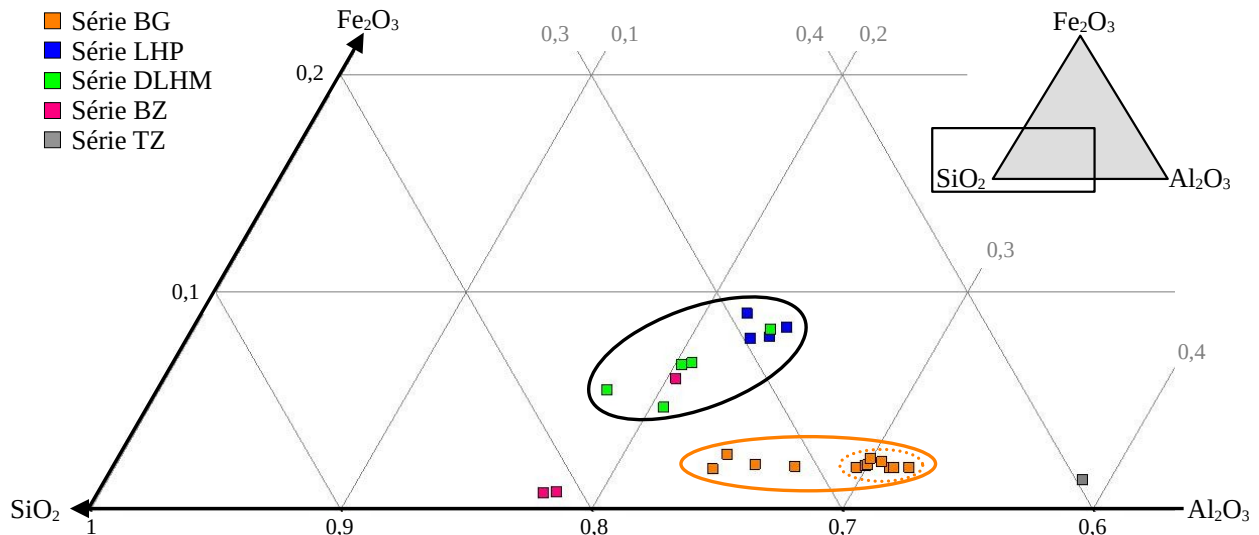


Figure 28 : Ternaire des majeurs (SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3) en proportion en poids d'oxyde de la composition des pâtes du corpus

Ces deux groupes présentent les différences typiques entre les pâtes produites au Nord et au Sud de la Chine, avec des taux d'alumine assez élevés dans les productions du Nord, généralement supérieurs à 25 %, alors que les productions du Sud présentent des taux inférieurs à 23 % [31].

Le groupe associé à la série BG (orange) contient huit échantillons bien resserrés sur le diagramme dont les compositions sont très proches (ovale en pontillé). BG-01, BG-02, BG-04 et BG-05 se démarquent par leur taux d'alumine faible pour des productions du Nord, respectivement de 22,4 %, 25,6 %, 24,3 % et 22,7 % comparés au taux moyen de 28,6 % des autres échantillons (avec un écart-type de 0,7 %). Hors majeurs, BG-04 et BG-05 présentent des taux d'oxyde de magnésium un peu plus faibles que les autres. BG-03, dont la pâte était très foncée par comparaison aux autres échantillons de la série BG, possède des proportions en majeurs qui correspondent au sous-groupe resserré. Cependant, il possède un taux d'oxyde de titane particulièrement élevé de 1,8 % alors que la moyenne des autres échantillons est à 1,0 % (avec un écart-type de 0,1 %).

Le groupe associé aux productions du Fújiàn (noir) est un peu plus épars. BZ-01, dont la pâte est optiquement très proche de celles des séries DLHM et LHP, entre également dans ce groupe. Hors majeurs, les taux d'oxyde de calcium des différents échantillons sont très variables au sein d'une même série, avec des taux en moyenne à 0,15 % (avec un écart-type de 0,07 %) pour la série LHP bien plus faibles que ceux de la série DLHM à 0,6 % en moyenne (avec un écart-type de 0,2 %). L'échantillon DLHM-19, dont la pâte était plus claire que celles des autres de ce groupe, possède des taux d'oxydes de fer, de titane et de phosphore significativement inférieurs aux autres échantillons des séries LHP et DLHM, respectivement de 4,5 % contre 7 % en moyenne (avec un

écart-type de 1 %), de 0,4 % contre 0,9 % en moyenne (avec un écart-type de 0,2 %) et de 0,08 % contre 0,13 % en moyenne (avec un écart-type de 0,02 %). BZ-01 contient quant à lui des taux d'oxydes alcalins (sodium et potassium) un peu plus élevés que les autres échantillons de ce groupe.

Les échantillons BZ-02, BZ-03 et TZ-28 sont tous trois très éloignés de ces deux groupes. BZ-02 et BZ-03 ont des taux de silice particulièrement élevés (78,4 % et 76,9 %). Aucune trace de phosphore n'a été détectée dans les pâtes ces échantillons. Leur taux d'oxydes de sodium sont très différents, autour de 0,1 % pour BZ-02 et de 0,8 % pour BZ-03. Au contraire, l'échantillon TZ-28 présente un taux d'alumine très élevé (26,9 %) et une composition de pâte typique des fours de Dìng [185,186].

Des analyses par XRF ont également été effectuées sur les surfaces exposées de la pâte de certains tessons de la série BG à l'Institute of Silicate Cultural Heritage [187]. Ces analyses présentant des différences assez significatives avec les données PIXE, quelques analyses complémentaires par EDS ont été effectuées sur les sections à des fins de comparaison. Les compositions mesurées sur BG-05 et BG-06 sont indiquées en exemple dans le Tableau 5 ci-dessous.

Oxyde (%w)	BG-05			BG-06		
	XRF	PIXE	EDS	XRF	PIXE	EDS
Na ₂ O	1,29	0,14	0,26	1,42	0,38	0,42
MgO	0,72	0,60	0,73	0,60	0,68	0,74
Al ₂ O ₃	23,59	22,70	24,44	26,53	29,22	29,72
SiO ₂	68,23	68,89	68,41	65,46	62,99	62,62
K ₂ O	2,53	2,90	2,47	2,31	2,56	2,47
CaO	0,51	0,76	0,73	0,70	1,14	1,10
TiO ₂	1,06	1,37	1,10	0,94	0,95	1,05
Fe ₂ O ₃	2,06	2,39	1,86	2,03	1,81	1,89
Autre	0,01	0,26	0,00	0,01	0,26	0,00

Tableau 5 : Comparaison de la composition des pâtes de BG-05 et BG-06 obtenues en XRF, PIXE et EDS

Pour BG-05 l'exception de l'oxyde de sodium qui a une concentration très élevée par rapport aux taux mesurés en PIXE et EDS, les valeurs sont plutôt comparables pour les autres oxydes et la variabilité provient sans doute du bouclage à 100 % à cause de ce taux de sodium très élevé. Pour BG-06 au contraire, les variations sont significatives sur l'alumine, la silice et les oxydes de sodium, titane et fer. Il y a très peu d'écart entre les valeurs mesurées en PIXE et en EDS. Les différences principales sont observées entre la XRF, pour laquelle les analyses ont été effectuées à la surface des échantillons, et les deux autres techniques pour lesquelles elles ont été effectuées sur des sections transverses fraîches. Ainsi, il semble plausible de les expliquer par les conditions d'exposition environnementale de la zone analysée, par exemple en considérant l'éventuel piégeage de matière post-dépôt dans les pores exposés de la pâte.

3) Caractérisation structurale

Des analyses structurales par XRD sur les sections transverses ont également été effectuées sur les pâtes pour caractériser les différentes phases cristallines présentes. En plus de pics associés à ces phases, tous les diffractogrammes obtenus sur les pâtes présentent une bosse large plus ou moins importante autour de 20 à 27°, caractéristique de phases vitreuses riches en silice. Ces bosses indiquent que les pâtes ont un niveau de vitrification relativement important. Un bilan des phases cristallines identifiées est présenté dans le Tableau 6.

Échantillon	Mullite	Quartz	Cristobalite	Hématite	Autre
BG01	X	X	X		
BG02	X	X	X	X	
BG03	X	X	X		
BG04	X	X	X		Spinelle
BG05	X	X	X		Indialite/Cordiérite
BG06	X		X		
BG07	X	X			
BG08	X	X	X		
BG09	X	X	X		
BG10	X		X		
BG11	X	X	X		Pic non-indexé à 34,2°
BG12	X	X	X		Spinelle
BZ01	X	X	X	X	
BZ02	X	X	X		
BZ03	X	X			
DLHM04	X	X	X	X	Magnetite
DLHM06	X	X	X	X	Pseudobrookite
DLHM19	X	X	X		
DLHM36	X	X	X		Magnetite
DLHM40	X	X	X	X	Magnétite
LHP01	X	X	X	X	Magnétite
LHP02	X	X	X	X	Magnétite
LHP03	X	X	X	X	
LuhuWu	X	X	X	X	Magnétite

Tableau 6 : Identification des phases cristallines dans les pâte des échantillons archéologiques

La totalité des pâtes des échantillons possède de la mullite, un composé à base d'alumine (Al_2O_3) et de silice (SiO_2) en ratios variant entre 3:2 et 2:1 [188]. Cette phase apparaît à haute température, en grande quantité à partir de 1050° dans les pâtes riches en kaolin avec une croissance accélérée aux températures autour de 1200 à 1300°C [189,190]. De plus, son apparition est favorisée par la présence de fer [191], comme c'est le cas dans les pâtes étudiées. Sa présence dans

tous les échantillons suggère des températures de cuisson élevées, ce qui est cohérent avec les techniques disponibles sous les Sòng.

Des dioxydes de silicium (SiO_2), en particulier du quartz et de la cristobalite, ont également été détectés dans la plupart des pâtes. Le quartz étant communément utilisé comme dégraissant dans les pâtes à céramiques, sa présence n'est pas surprenante. La cristobalite, une espèce qui se forme à partir de températures supérieures à 1000°C dans des phases vitreuses à base de silice [192], suggère à nouveau des cuissons à des températures élevées.

Diverses phases riches en fer, comme de l'hématite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), de la magnétite (Fe_3O_4) et de la pseudobrookite (Fe_2TiO_5), ont été détectées dans les pâtes qui apparaissent les plus foncées. Cette corrélation entre la couleur des pâtes et la présence des espèces semble cohérente au vu de la couleur naturelle de ces minéraux [193]. De l'hématite a également été détectée dans la pâte de BG-02, pourtant beaucoup plus claire que les autres qui en contiennent.

Enfin d'autres composés, comme des spinelles (MgAl_2O_4) et de l'indialite ou de la cordiérite (dimorphes de $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$) ont été ponctuellement détectés sur BG-04, BG-12 et BG-05.

Afin d'évaluer les proportions des différentes phases et de renseigner davantage la structure de la mullite, dont les paramètres de maille peuvent être reliés au ratio $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ [189], des calculs de structures par Rietveld ont été effectués [177,178]. Les détails des résultats peuvent être consultés en Annexe 5 : Affinements par la méthode de Rietveld, Tableau 21 et Tableau 22 page 263. Il faut noter que les Rwp associés aux affinements sont en moyenne plus grands pour les échantillons du Fújiàn que ceux de la série BG, probablement du fait de la grossièreté plus importante de leur pâte.

Ces calculs ont révélé que la mullite est la phase cristalline principale des pâtes des différents échantillons. Sa proportion est assez variable au sein d'une même série, elle constitue par exemple 50 % des espèces cristallines de la pâte de BG-04 et 99 % de celles de BG-07. Sur l'ensemble des séries confondues, elle dépasse ou se situe autour de 50 % des espèces cristallines, sauf pour BZ-02 et BZ-03 dont elle constitue respectivement 39,7 % et 35,5 % des pâtes. Le quartz et la cristobalite sont les autres phases présentes en proportions importantes. Pour les pâtes des séries DLHM et LHP, l'hématite représente au maximum un peu moins de 6 % des espèces cristallisées. Les autres oxydes de fer sont présents en proportions négligeables et n'ont pas été pris en compte pour les affinements. La cordiérite/indialite représente 5,9 % de la pâte de BG-05.

Les paramètres de maille de la mullite calculés avec cette méthode présentent de petites variations qui sont en accord avec les deux groupes cohérents mis en valeur par les analyses PIXE. En effet, ceux de la série BG ont été déterminés en moyenne (avec les écarts-types indiqués entre parenthèses) à $a = 7,543 \text{ \AA}$ (0,004 Å), $b = 7,698 \text{ \AA}$ (0,005 Å) et $c = 2,889 \text{ \AA}$ (0,002 Å) alors que ceux des pâtes du Fújiàn valent $a = 7,57 \text{ \AA}$ (0,01 Å), $b = 7,73 \text{ \AA}$ (0,01 Å) et $c = 2,902 \text{ \AA}$ (0,007 Å). Ces différences de paramètres de maille pourraient suggérer que la mullite des échantillons du Fújiàn contient un peu moins d'aluminium que ceux de la série BG, ce qui est cohérent avec leur composition globale mesurée par PIXE. Cependant, la mullite pouvant également intégrer du fer dans sa structure [194,195], il n'est pas impossible que ces différences soient également dues à l'incorporation de cet élément dans les mullites des pâtes riches en fer du Fújiàn.

4) Bilan

Les caractérisations optiques et chimiques des pâtes du corpus archéologique ont permis de faire ressortir les différences entre les séries produites par les différents sites, en particulier sur le site de Yàozhōu (série BG), le site de Dìng (TZ-28) et les sites du Fújiàn (séries DLHM et LHP). Elles ont également fait ressortir l'hétérogénéité entre les échantillons de la série BZ, avec BZ-01 qui possède des propriétés proches des échantillons du Fújiàn alors que BZ-02 et BZ-03 sont franchement distincts avec leurs pâtes très blanches et riches en silice. La série BG est également un peu hétérogène, avec BG-01 à BG-05 qui se démarquent légèrement des autres échantillons avec leur composition légèrement différente, en particulier sur les taux d'alumine assez faibles pour des productions de cette région, et/ou leur aspect visuel différent.

La caractérisation structurale de ce corpus a révélé que les pâtes sont partiellement vitrifiées et présentent deux phases qui se forment à haute température : la mullite et la cristobalite, indiquant que les cuissons ont été effectuées à haute température, conformément à la technologie disponible à l'époque des Sòng. La mullite est la phase principale des pâtes, représentant dans la plupart des cas autour ou plus de la moitié des phases cristallines présentes. Les pâtes des échantillons du Fújiàn possèdent également des oxydes riches en fer, ce qui est en bon accord avec leur couleur plus foncée. Enfin, les paramètres de maille de la mullite sont légèrement différents entre les échantillons de Yàozhōu et ceux du Fújiàn, ce qui suggère soit un taux d'alumine plus faible, soit l'incorporation de fer dans la mullite du Fújiàn.

B – Caractérisation générale des glaçures

1) Observations optiques

Des observations au microscope optique des surfaces et sections transverses des glaçures de chaque échantillon ont été effectuées afin de compléter celles effectuées à l'échelle macroscopique et à la loupe binoculaire.

Elles ont souligné l'homogénéité de la couleur brune des glaçures entre les différents échantillons de la série BG : elles sont opaques et assez brillantes de la couleur brun « sauce » caractéristique (cf. Figure 29 page suivante). Seule celle de BG-03 est significativement différente des autres (cf. Figure 29-b). Bien qu'elle possède quelques zones dont la couleur se rapproche un peu de cette teinte typique, elle est globalement plus terne et translucide, comme le suggère la possibilité de voir des bulles piégées à l'intérieur de sa glaçure.

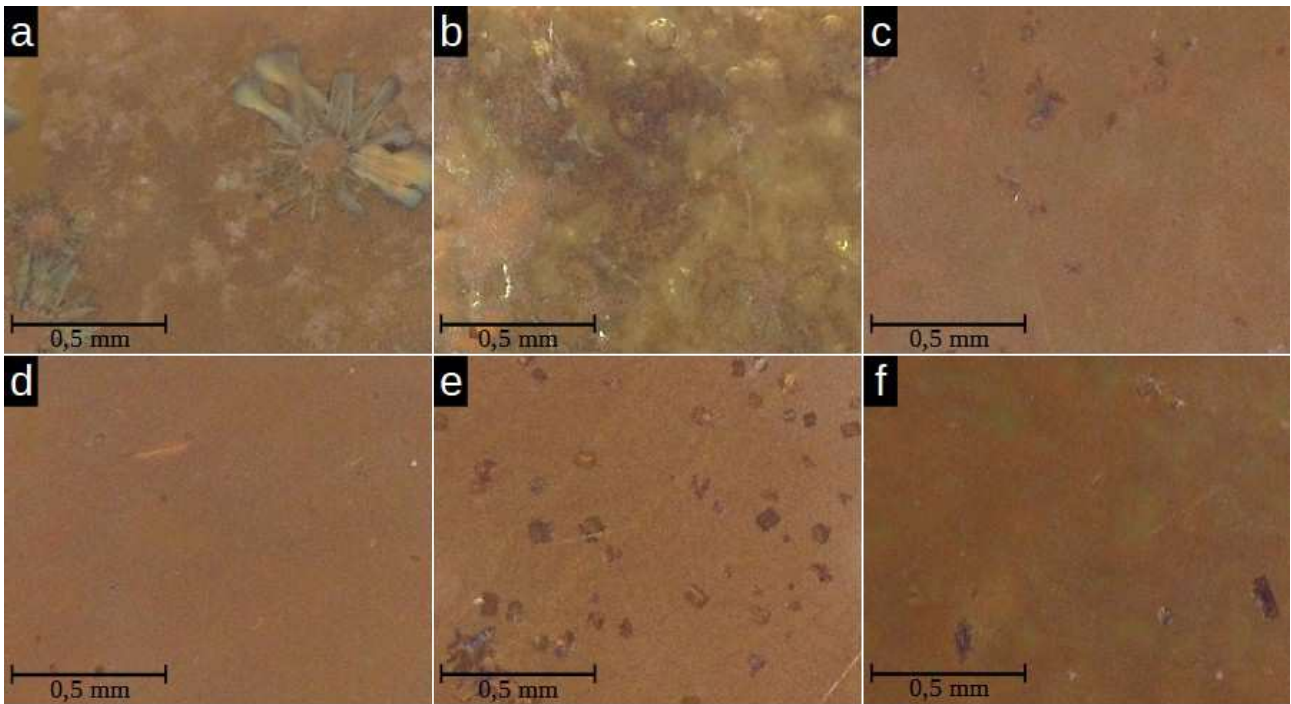


Figure 29 : Images optiques (grossissement $\times 100$) des glaçures brunes de BG-01 (a), BG-03 (b), BG-05 (c), BG-08 (d), BG-09 (e) et BG-16 (f)

Les zones qui apparaissent les plus homogènes présentent de légères variations de couleur perceptibles à la loupe binoculaire, qui donnent l'impression que de minuscules aspérités s'y trouvent. Bien qu'elles possèdent des points communs, l'observation des glaçures a également révélé la présence de défauts ponctuels assez différents entre les échantillons. Typiquement, les glaçures de BG-01 et BG-03 (cf. Figure 29-a et b) présentent de gros défauts de plusieurs centaines de microns visuellement très similaires aux fleurs de mullite ou d'anorthite observées sur les glaçures « fourrure de lièvre » de Jiàn [99,163]. De tels défauts ont également été observés sur BG-05 et les zones brunes de BG-11. Des défauts plus petits, d'une taille inférieure à $100\ \mu\text{m}$, ont également été observés sur les glaçures de BG-05, BG-08, BG-09 ou BG-16 par exemple (cf. Figure 29-c à f). La densité de ces défauts varie fortement en fonction des échantillons : ils sont parfois très rares, comme à la surface de BG-08 ou très nombreux, comme sur la glaçure de BG-09 (cf. Figure 29-d et e). Ils ont été observés sur tous les échantillons de la série BG à l'exception de BG-01 et BG-03.

Des observations par microscopie optique à grossissements plus importants de ces défauts ont révélé qu'ils sont constitués de cristaux possédant une structure dendritique très régulière (cf. Figure 30).

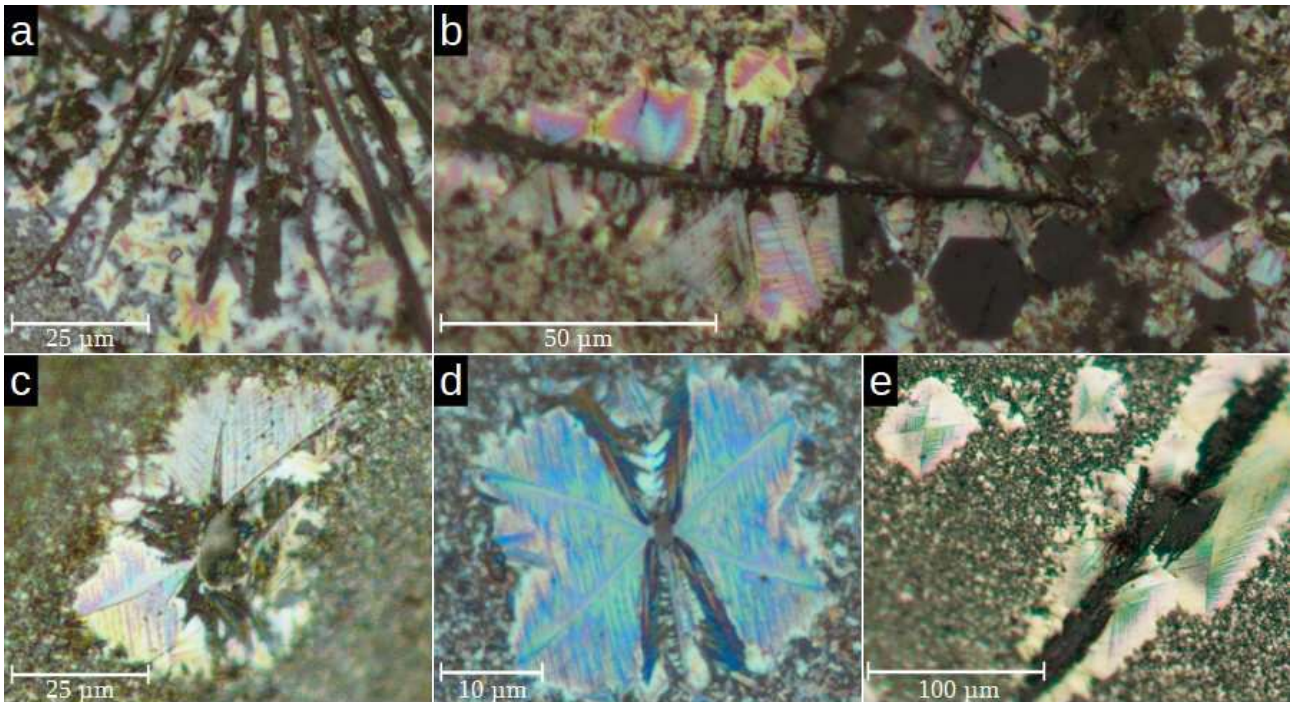


Figure 30 : Images optiques (grossissements $\times 100$, 200 et 500) des défauts à la surface de BG-03 (a), BG-05 (b), BG-06 (c), BG-08 (d) et BG-09 (e)

Les plus gros cristaux dendritiques semblent pousser soit sur des cristaux en aiguille, ce qui rappelle les observations effectuées sur la mullite des grès japonais [162] (cf. Figure 30a et b), soit sur des cristaux d'aspect globuleux (cf. Figure 30-c à e). Certaines structures dendritiques paraissent cependant croître sans support (cf. Figure 30-e). Leur structure semble très ordonnée et ils apparaissent irisés sous la lumière du microscope. Des cristaux hexagonaux ont également été ponctuellement observés sur la surface de l'échantillon BG-05 uniquement (cf. Figure 30-b). Contrairement aux aiguilles ou aux cristaux globuleux décrits juste avant, ils ne semblent pas favoriser la croissance des structures dendritiques.

Ces observations permettent également de justifier la sensation d'aspérités ressentie sur les images à la loupe binoculaire des zones homogènes : elles montrent la présence de cristaux microscopiques très brillants répartis sur l'ensemble de la surface des glaçures autour des défauts.

Les zones plus foncées des échantillons BG-02 et BG-11 sont légèrement translucides, comme le suggère la possibilité de voir à leur travers des bulles piégées à l'intérieur de glaçure (cf. Figure 31-a et c, page suivante). La glaçure BG-11 semble plus foncée que celle de BG-02, sans doute à cause de son épaisseur (de l'ordre de $415 \mu\text{m}$ pour BG-11 et $375 \mu\text{m}$ pour BG-02 d'après les mesures effectuées sur les sections transverses). Elle possède également des points clairs qui ressemblent à de la dégradation de sa surface. La glaçure noire de BG-03 quant à elle ne semble pas translucide. Sa surface possède une couleur hétérogène, avec des zones plus claires qui sont recouvertes de petits cristaux dendritiques qui semblent similaires à ceux identifiés sur les surfaces brunes des autres échantillons de la série BG. (cf. Figure 31-b et d).

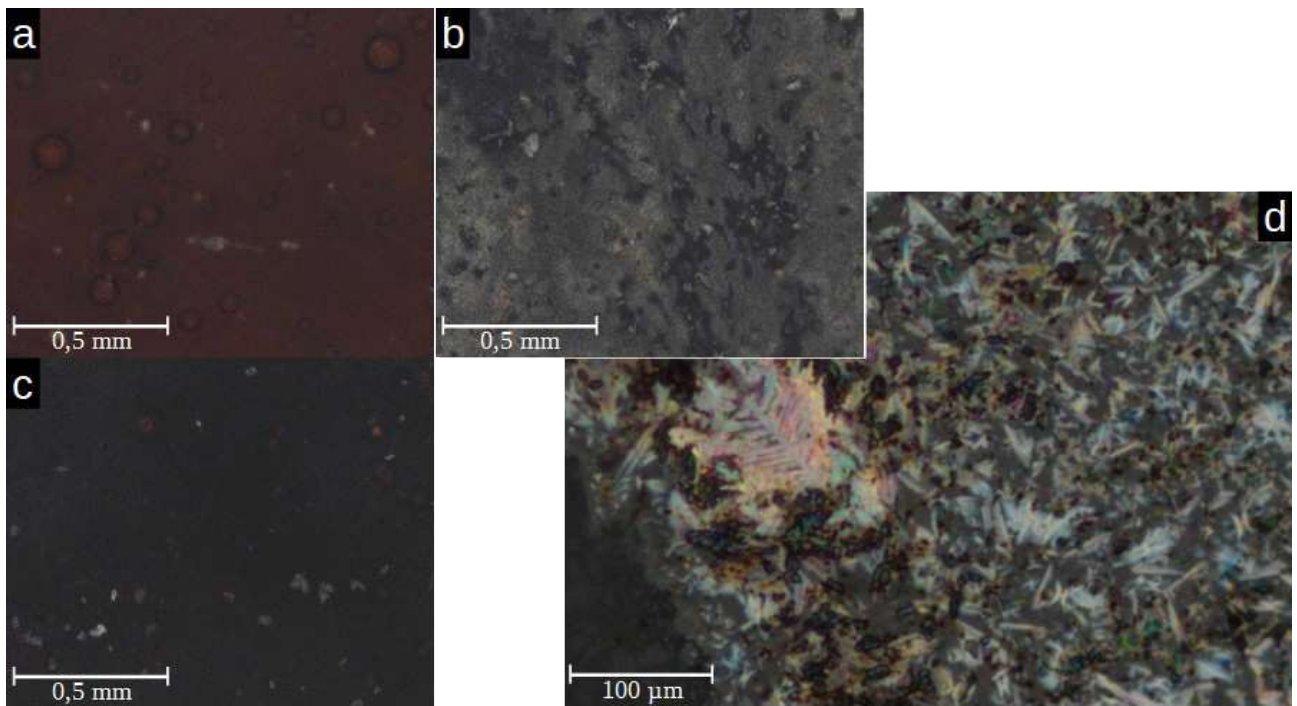


Figure 31 : Images optiques (grossissement x100) des surfaces des zones sombres des glaçures de BG-02 (a), BG-03 (b) et BG-11 (c), détail de la surface noire de BG-03 au grossissement x200 (d)

Les échantillons de la série DLMH dont les surfaces ont pu être observées ainsi que les échantillons LHP-02, LuhuWu et BZ-01, qui sont des fourrures de lièvre « conventionnelles », c'est-à-dire brunes sur fond noir, présentent des coulures brunes d'un brun assez similaire à celui des glaçures brunes de la série BG (cf. Figure 32-a et c à f).

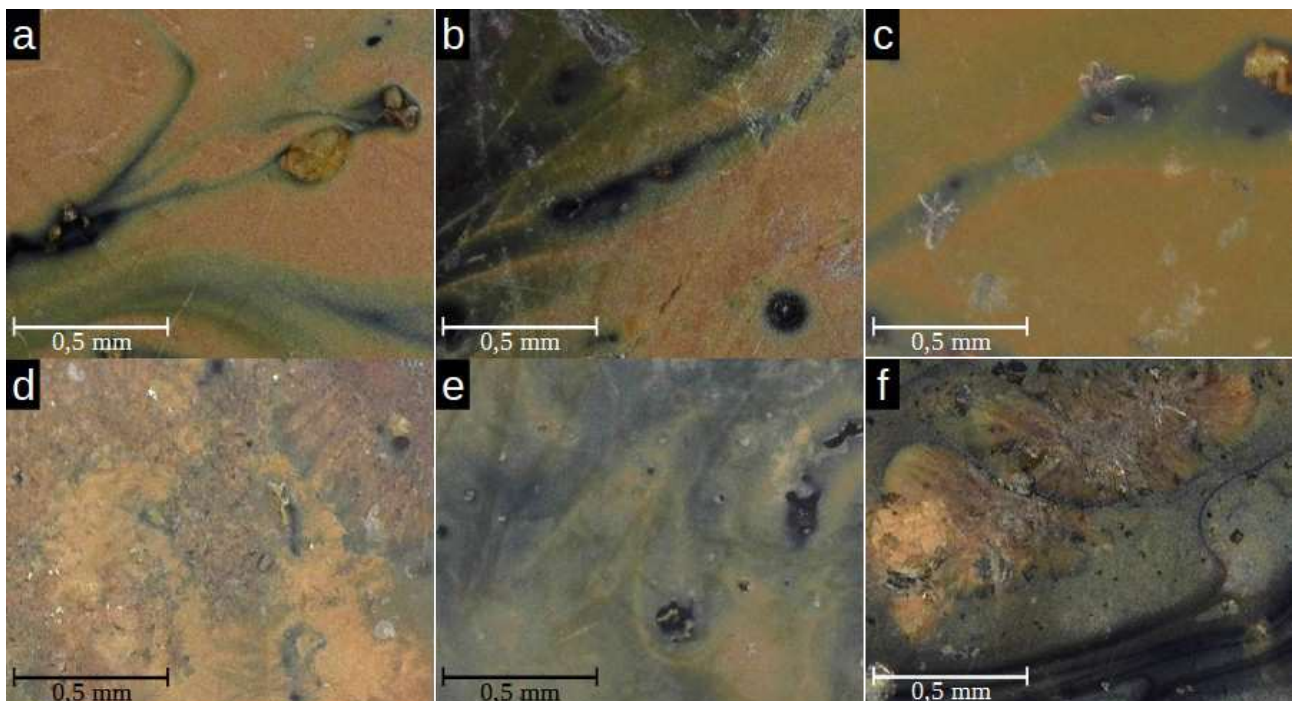


Figure 32 : Images optiques (grossissement x100) des surfaces des glaçures de BZ-01 (a), BZ-02 (b), LHP-02 (c), DLHM-36 (d), DLHM-40 (e) et LuhuWu (f)

Ces coulures ont l'air, à ces grossissements, de volutes qui ressemblent à un écoulement de la glaçure, comme suggéré par plusieurs études proposant un tel mécanisme pour la formation de ces motifs [98,99]. Comme pour les échantillons de la série BG, des défauts ponctuels ont été observés sur ces glaçures, tels que les gros défauts similaires aux fleurs de mullite ou d'anorthite décrites dans la littérature sur DLHM-36, LuhuWu et BZ-01 [99,163] ou les structures dendritiques croissant sur des cristaux globuleux sur LHP-02 par exemple. Des indices de dégradations des surfaces, comme des rayures ou de la piqûration, sont également visibles sur une grande partie de ces échantillons. La surface de BZ-02, bien qu'en apparence macroscopique très différente des « fourrures de lièvre », présente également des zones brunes assez similaires aux « fourrures de lièvre » à l'échelle microscopique (cf. Figure 32-b). La glaçure visible sous ces coulures est néanmoins plus translucide que celles des autres échantillons, d'un aspect plus proche des zones sombres des échantillons BG-02 et BG-11 décrits précédemment.

Les autres échantillons étudiés dans ce travail ont un aspect à l'échelle microscopique assez différent de ceux décrits précédemment qui pouvaient être groupés (cf. Figure 33).

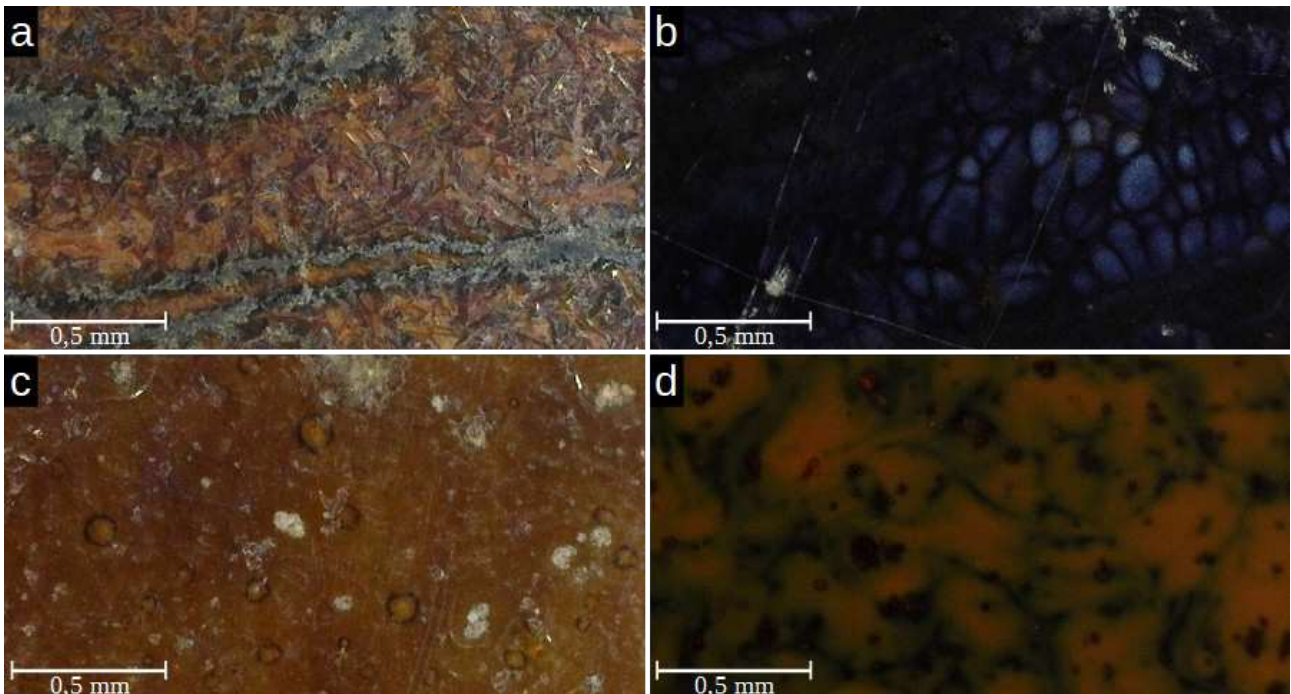


Figure 33 : Images optiques (grossissement $\times 100$) des surfaces des glaçures de LHP01 (a), LHP-03 (b), BZ-03 (c) et TZ-28 (d)

LHP-01 possède une surface recouverte de longs cristaux dendritiques particulièrement bien développés, atteignant jusqu'à plus de $100\ \mu\text{m}$ sur les zones brunes et de plus petits cristaux sur ses nervures noires (cf. Figure 33-a). LHP-03 possède quant à lui une surface assez rayée où il se distingue, comme sous la surface, des zones globuleuses légèrement plus claires qui réfléchissent davantage la lumière que le reste de la glaçure (cf. Figure 33-b). Ce sont ces globules regroupés qui forment les motifs rappelant les « fourrures de lièvre » translucides légèrement argentées décrites dans le chapitre précédent. BZ-03 a une glaçure qui semble relativement dégradée par rapport aux autres échantillons, elle n'est pas lisse et possède beaucoup d'indices de piqûration. Les zones où la glaçure est plus claire semblent moins piqûrées que la zone foncée. La glaçure est translucide sur ces deux zones comme le montre l'apparition des bulles par transparence (cf. Figure 33-c). TZ-28

présente enfin une glaçure aux couleurs très similaires à celles des « fourrures de lièvre » (c'est-à-dire avec des motifs bruns sur un fond noir), cependant elle ne possède pas cet aspect de coulure, plutôt des motifs irréguliers. Les observations à fort grossissement révèlent la présence d'amas de petits cristaux rougeâtres de l'ordre de 50 à 100 μm régulièrement dispersés sur la surface (cf. Figure 33-d).

Les sections de ces échantillons ont révélé que leurs glaçures sont d'épaisseurs variables, les plus fines faisant environ 110 μm comme celle de BG-12, les plus épaisses jusqu'à près de 700 μm comme celle de BG-07. Elles sont très sombres à l'intérieur comparées à la couleur de leur surface, donnée par une fine couche brune superficielle, conformément aux premières observations effectuées dès les années 1940 [123]. L'intérieur des glaçures apparaît franchement noir sur les sections de la plupart des échantillons, brun foncé légèrement translucide pour certains autres, probablement dû à l'épaisseur de la glaçure prise dans la résine. La glaçure de BG-12 apparaît beaucoup plus claire que les autres. De nombreuses bulles sont piégées dans les glaçures des échantillons de la série BG ainsi que dans les échantillons BZ-02 et BZ-03. Les glaçures des échantillons des séries LHP et DLHM, ainsi que de BZ-01 en contiennent qualitativement moins.

2) Caractérisation structurale

* Caractérisation structurale systématique par XRD

Afin de caractériser davantage ces échantillons, en particulier d'identifier les différents cristaux observés optiquement à leur surface, des analyses par XRD ont été effectuées. Lorsque l'échantillon contenait des zones de couleurs différentes suffisamment larges pour y effectuer des pointés, une analyse sur chacune d'elle a été effectuée afin de pouvoir les comparer. Un bilan des phases identifiées sur ces différentes zones est présenté dans le Tableau 7.

Échantillon	$\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hématite	Mullite	Quartz	Cristobalite	Autres phases
BG-01	X		X			
BG-02 (brun)	X				X	
BG-02 (foncé)	X				X	
BG-03 (brun)	X		X	X		
BG-03 (noir)	X			X	X	Magnétite/Magnésioferrite
BG-04 (brun)	X					
BG-04 (taches)	X					
BG-05	X					Indialite/Cordiérite
BG-06	X					
BG-07	X					Pic non-indexé à 56,1°
BG-08	X					
BG-09	X					
BG-10	X					
BG-11 (brun)	X					
BG-11 (foncé)				X		
BG-12	X					

Échantillon	$\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hématite	Mullite	Quartz	Cristobalite	Autres phases
BG-13	X					
BG-14	X					
BG-15	X				X	
BG-16	X				X	
LHP-01	X	X				
LHP-02 (brun)	X					
LHP-02 (noir)				X		
LHP-03						
LuhuWu	X		X	X		
DLHM-19	X			X		
DLHM-36 (brun)	X	X		X	X	
DLHM-36 (noir)	X			X	X	
DLHM-40 (brun)	X			X		
DLHM-40 (noir)						
BZ-01 (brun)	X		X	X		
BZ-01 (noir)				X		
BZ-02 (brun)	X			X		
BZ-02 (foncé)						
BZ-03 (brun)				X		
BZ-03 (foncé)				X	X	Magnétite/Hercynite
TZ-28 (brun)	X	X		X	X	
TZ-28 (noir)	X	X		X	X	

Tableau 7 : Identification des phases cristallines dans les glaçures des échantillons archéologiques

D'un point de vue global, les analyses ont révélé la présence de la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ sur la quasi-totalité des échantillons analysés : tous à l'exception de LHP-03 et BZ-03. Cette phase est, en particulier, présente plutôt sur les zones brunes que les zones noires des échantillons possédant les deux couleurs à leur surface. Ces résultats sont cohérents avec la littérature, qui a démontré que la présence de cet oxyde est récurrente à la surface des glaçures brunes des productions de nombreux fours actifs sous la dynastie Sòng, dont ceux de Yàozhōu et Jiàn étudiés ici [112,163–167].

D'autres oxydes de fer, comme de l'hématite et de la magnétite ou des spinelles riches en fer comme l'hercynite (FeAl_2O_4) ou la magnésioferrite (MgFe_2O_4) ont également été détectés sur quelques échantillons. La présence d'hématite avait déjà été notifiée sur les glaçures brunes d'échantillons à glaçure « fourrure de lièvre » [117]. Les spinelles riches en fer sont quant à eux beaucoup plus rares, présents seulement sur les zones plus sombres de ces glaçures, en accord avec leur couleur noire naturelle [193].

Du quartz et de la cristobalite ont également été détectés sur plusieurs échantillons. Le quartz étant un minéral très commun naturellement [193], il est probable que sa présence soit due à des grains isolés présents dans la matière première qui n'ont pas fondu au cours de la cuisson. Cette hypothèse est d'ailleurs corroborée par les diffractogrammes 2D, sur lesquels les anneaux associés

au quartz sont généralement constitués de quelques points isolés et très brillants, suggérant la présence d'un faible nombre de grains fortement orientés.

De la mullite a également été détectée à la surface des glaçures de BG-01, BG-03 (sur la zone brune), LuhuWu et BZ-01. Ces glaçures présentant, d'après les observations optiques, des défauts locaux ressemblant aux fleurs de mullite décrites dans la littérature [163], il n'est pas surprenant d'en retrouver sur ces échantillons. Enfin, de l'indialite/cordiérite a été observée sur l'échantillon BG-05. La présence de ce minéral n'est pas particulièrement documentée à la surface de ce type de glaçure.

Comme évoqué précédemment, la comparaison des diffractogrammes obtenus entre les zones noires et brunes d'un même échantillon a révélé que la phase ϵ -Fe₂O₃ est souvent présente en plus faible quantité, voire non détectée sur les zones possédant une glaçure plus sombre (cf. Figure 34).

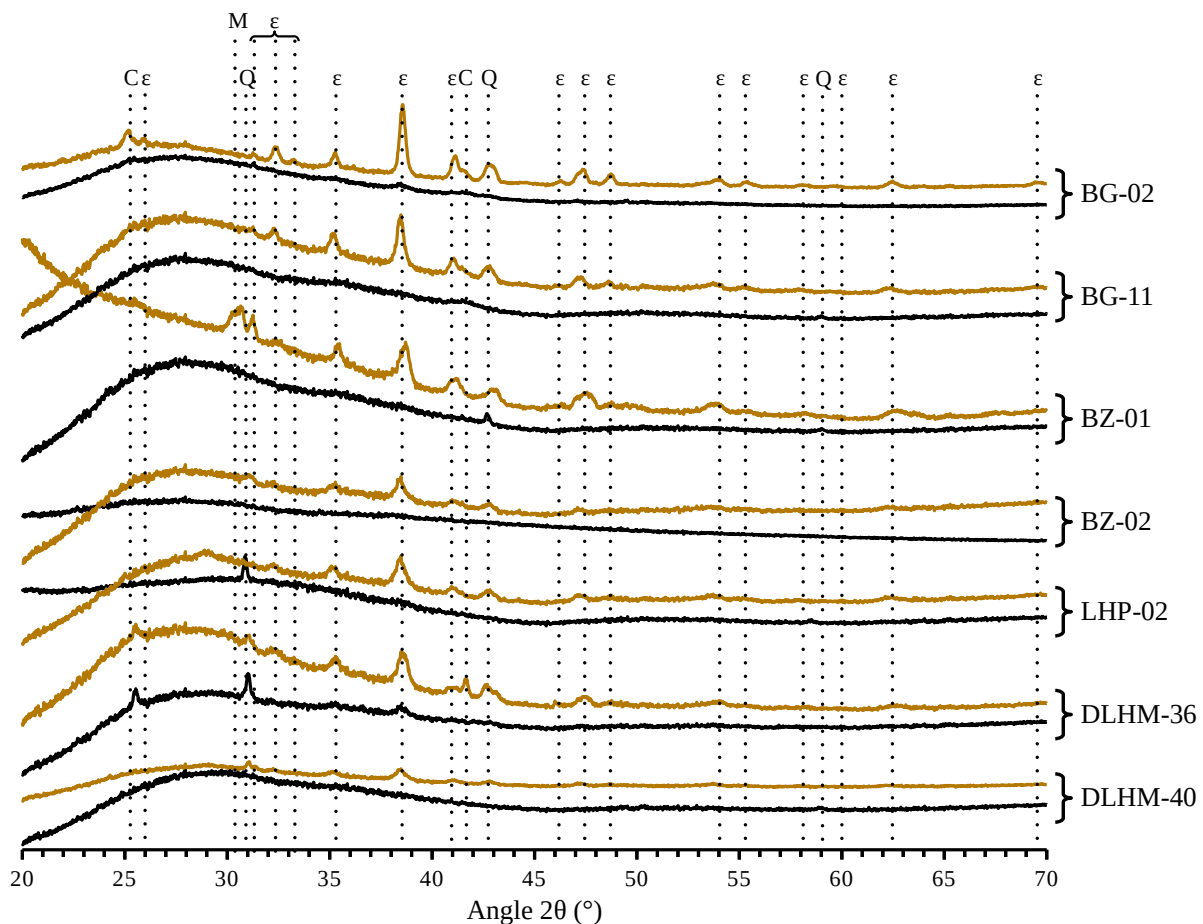


Figure 34 : Diffractogrammes enregistrés sur les échantillons possédant une zone noire et une zone brune, avec attribution des phases (C = cristobalite, ϵ = ϵ -Fe₂O₃, M = mullite et Q = quartz)

Cette observation est cohérente avec les suggestions des études qui relient la couleur brune caractéristique des glaçures à la présence de cette phase [116,165]. Des travaux sur ses propriétés optiques ont révélé que des suspensions de nanoparticules, pures ou substituées par de l'aluminium, possèdent une couleur orange [136,137]. Il est ainsi tout a fait plausible que cette teinte brune résulte de l'association des cristaux de la phase ϵ -Fe₂O₃ orangée avec la couche noire de glaçure riche en fer au-dessous [196].

Pour renseigner davantage la structure de la phase ε -Fe₂O₃, en particulier la comparer avec une structure de référence (ICSD-51122), des affinements de Rietveld et Pawley ont été effectués sur les diffractogrammes sur lesquels cette phase a été identifiée. Cependant, la forte contribution de la glaçure, couplée à l'éventuelle faible intensité et relative largeur des pics, n'a donné aucun résultat sur les diffractogrammes de BG-02, BG-03, la zone tachetée de BG-04, LHP-01, LuhuWu, DLHM-19, DLHM-36 et BZ-02. Pour les autres, bien que la qualité de ces diffractogrammes ait permis d'obtenir une bonne correspondance entre le diffractogramme expérimental et celui calculé, des différences assez importantes ont parfois été constatées entre les affinements Rietveld et Pawley sur un échantillon, jusqu'à 0,035 Å pour certains paramètres (cf. Annexe 5 : Affinements par la méthode de Rietveld, Tableau 23 page 265). Une telle variabilité peut être due à l'affinement de facteurs dont l'influence se compenserait, comme le positionnement en z de l'échantillon, les paramètres de maille et la forme des pics. Des problèmes d'intensités pour les affinements de Rietveld ont été constatés, probablement dus principalement à de l'orientation préférentielle des cristallites dendritiques de la phase ε -Fe₂O₃, cependant les pics étant bien positionnés, les valeurs de paramètres de maille devraient être corrects.

En moyenne (et écart-type entre parenthèses), les paramètres de maille calculés en Rietveld valent $a = 5,093 \text{ \AA} (0,008 \text{ \AA})$, $b = 8,75 \text{ \AA} (0,02 \text{ \AA})$ et $c = 9,41 \text{ \AA} (0,02 \text{ \AA})$ et ceux en Pawley $a = 5,094 \text{ \AA} (0,007 \text{ \AA})$, $b = 8,74 \text{ \AA} (0,02 \text{ \AA})$ et $c = 9,41 \text{ \AA} (0,02 \text{ \AA})$. Par rapport à la fiche de référence utilisée dont les paramètres sont $a = 5,095 \text{ \AA}$, $b = 8,789 \text{ \AA}$ et $c = 9,437 \text{ \AA}$, on remarque que ces paramètres sont en moyenne plus faibles. Une telle différence peut suggérer la présence de substitutions, par exemple d'aluminium, qui est d'une part présent en grande quantité dans la matrice vitreuse, dont d'autre part le rayon ionique est un peu plus faible que celui du fer, expliquant ainsi le rétrécissement de la maille, et pour lequel enfin la présence dans la phase ε -Fe₂O₃ a déjà été documentée [137,197].

*** Caractérisation locale par Spectroscopie Raman**

Afin de compléter les analyses structurales avec des analyses plus locales, en particulier pour documenter les défauts locaux observés sur certaines glaçures, des analyses par spectroscopie Raman ont été effectuées sur une sélection d'échantillons archéologiques (BG-01, BG-11, LHP-01, LHP-02, DLHM-19, DLHM-36 et DLHM-40). Ces analyses ont été complétées avec des données issues d'analyses préalables des échantillons BG-05, BG-08 et TZ-28 effectuées par Philippe Sciau et plus systématiques des échantillons de la série BG effectuées par l'équipe de Tian Wang (Institute of Silicate Cultural Heritage).

Ces analyses ont confirmé la présence de la phase ε -Fe₂O₃ sur tous ces échantillons grâce à son spectre Raman très caractéristique [117]. Elles ont également confirmé la présence de quartz dans divers échantillons, ainsi que d'un spinelle proche de la magnésioferrite sous forme de cristaux triangulaires à la surface de BG-03 [187,198] et de cordiérite ou d'indialite sous forme de cristaux hexagonaux à la surface BG-05, déjà remarqués suite aux observations microscopiques.

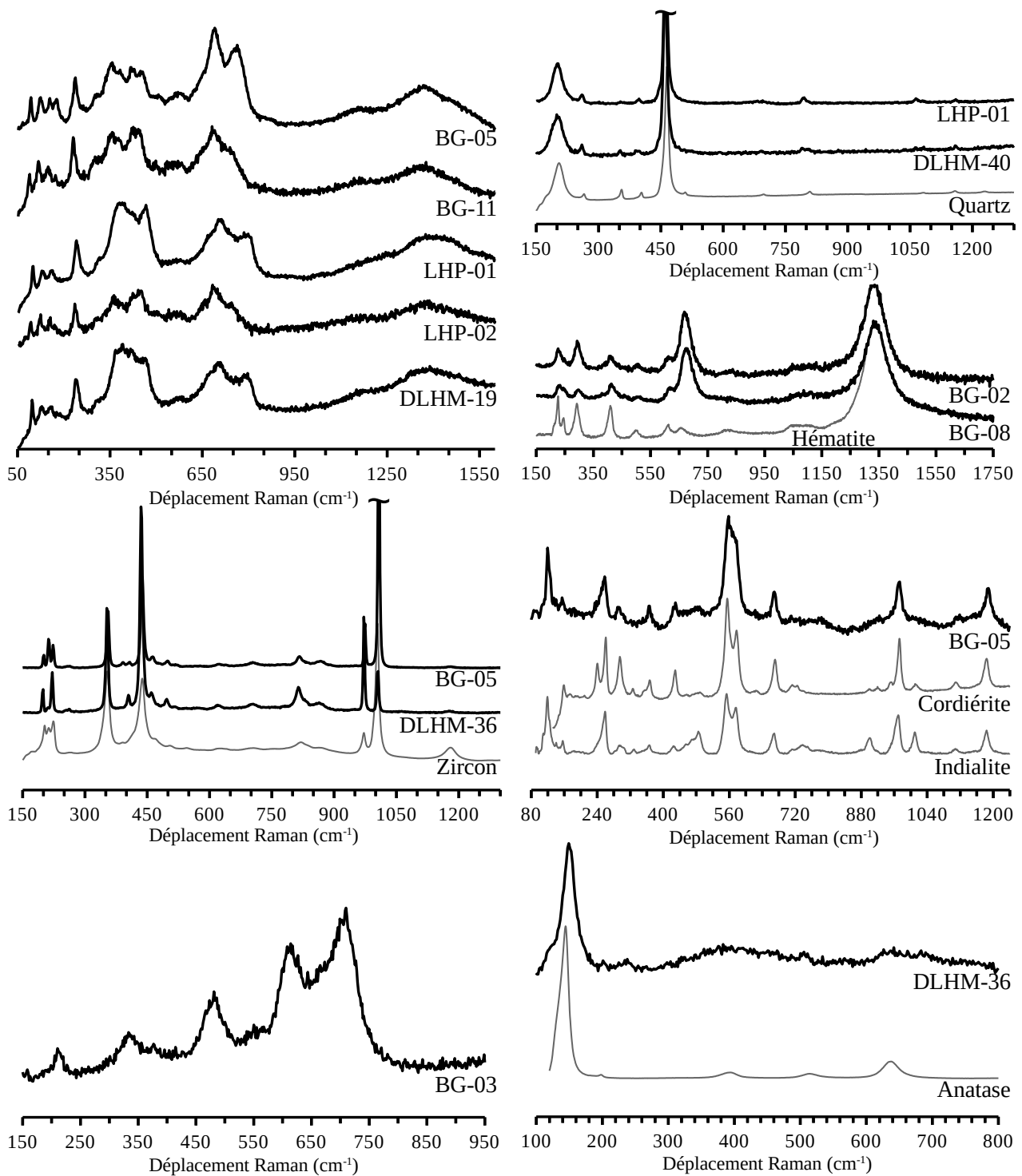


Figure 35 : Spectres Raman de phase ϵ - Fe_2O_3 , de quartz, d'hématite, de zircon, d'indialite/cordiérite, de magnésioferrite et d'anatase acquis sur plusieurs échantillons archéologiques (noirs) comparés avec des références de la base de donnée RRuff (gris)

En plus de confirmer la présence de phases déjà identifiées, les analyses par spectroscopie Raman ont également permis d'identifier des phases non détectées par XRD, sans doute à cause de leur faible quantité dans les échantillons. Tout d'abord quelques cristaux d'hématite ont été détectés sur des échantillons de la série BG. Des particules d'anatase (TiO_2) ont également été observées

ponctuellement sur les échantillons BG-04, BG-10 et DLHM-36. Elles proviennent probablement de la matière première et étaient suffisamment volumineuses et stables pour ne pas se transformer en rutile lors de la cuisson à haute température. En effet cette transformation s'effectue usuellement autour de 1000°C [199], température largement atteinte au vu de la présence de mullite et de cristobalite en grande quantité dans les pâtes.

Enfin et plus particulièrement, les particules globuleuses observées par microscopie optique sur lesquelles poussent des dendrites particulièrement longues ont été identifiées comme des grains de Zircon ($ZrSiO_4$). L'identification par spectroscopie Raman a été confirmée par des analyses EDS de cristaux de ce type sur BG-01, BG-02 et LHP-02. Il s'agit d'un minéral assez commun dans les roches détritiques comme celles utilisées pour produire les glaçures [193] et stable à haute température jusqu'à 1673°C [200], suggérant qu'il provient directement de la matière première. Il a été trouvé sur tous les échantillons analysés par spectroscopie Raman à l'exception de DLHM-19, DLHM-40 et LHP-01.

Des analyses un peu plus poussées de ces cristaux avec une excitatrice bleue à 458 nm polarisée verticalement et un spectromètre non polarisé ont révélé que, qu'elle que soit leur orientation, déterminée différente grâce à l'extinction de certains pics ou des variations importantes d'intensité (cf. Figure 36, flèches rouges), ils semblent favoriser la croissance de la phase ϵ - Fe_2O_3 .

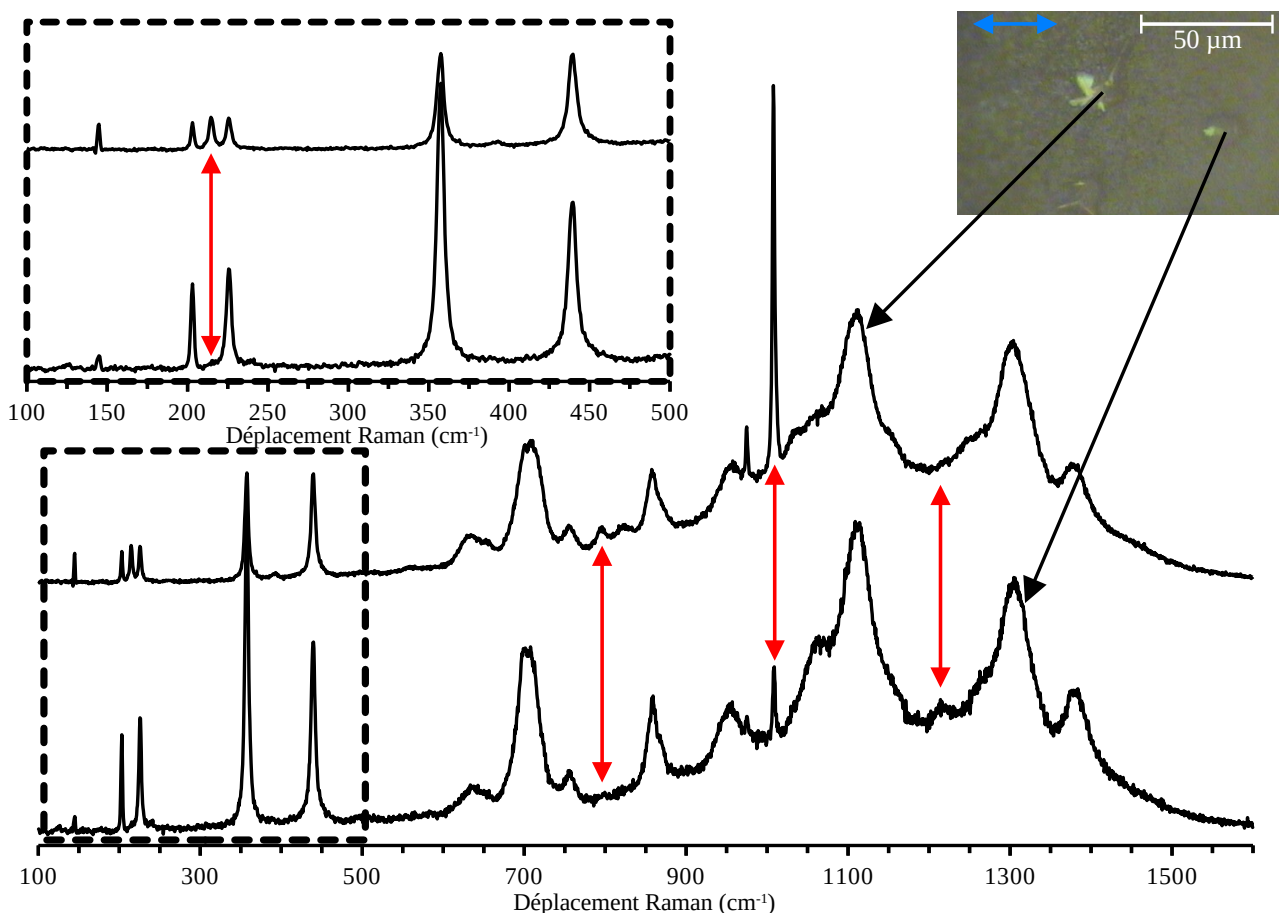


Figure 36 : Spectres Raman enregistrés sur deux cristaux de zircon de LHP-02 avec des orientations différentes (la flèche bleue représente la polarisation du laser sur l'échantillon)

3) Microstructure

Pour comprendre plus finement la morphologie des cristaux de phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, des observations et analyses de microstructures ont été effectuées par microscopie électronique.

D'une part, afin d'observer finement les cristaux en surface de la glaçure en s'affranchissant de l'opacité relative de la glaçure aux électrons, une attaque basique de la matrice vitreuse de BG-05 a été effectuée par Ren Zhao (Institute of Silicate Cultural Heritage). Pour cela, elle s'est appuyée sur les données de la littérature [150,156] et sur des tests effectués sur recréation. La solution retenue est une solution de soude concentrée à 5 mol.L^{-1} à 60°C pendant 4 h.

Les observations de ces surfaces ont révélé que les cristaux présentent une organisation à deux échelles. Tout d'abord, sur les branches primaires des dendrites, des branches secondaires poussent parallèles les unes aux autres, avec un écart de l'ordre de 200 à 250 nm (cf. Figure 37-a).

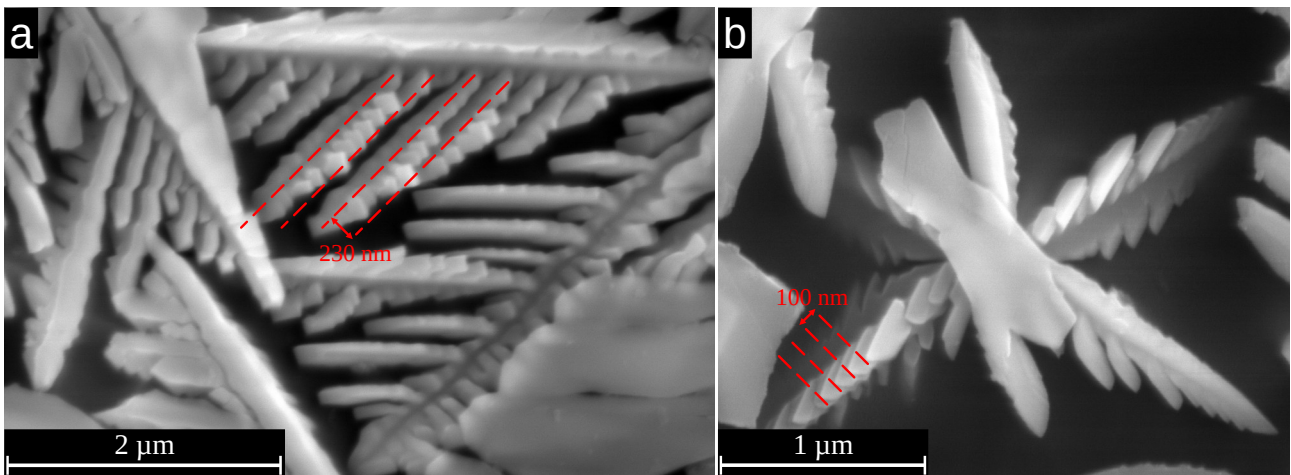


Figure 37 : Images SEM (© Ren Zhao) d'un réseau 2D de dendrites (SE, 10 kV, grossissement $\times 20000$) et d'une petite dendrite (SE, 15 kV, grossissement $\times 30000$) de BG-05

Cette organisation à deux dimensions en peigne très ordonnée permet aux structures dendritiques d'agir comme des réseaux en réflexion. L'écartement mesuré par microscopie électronique entre les dendrites secondaires permet en effet tout à fait d'interagir avec la lumière pour effectuer des interférences lumineuses, expliquant les irisations observées par microscopie optique. De plus, les branches sont elles-mêmes support d'empilements de petites plaquettes décalées les unes par rapport aux autres d'une distance de l'ordre de 100 à 110 nm (cf. Figure 37-b). Ces plaquettes sont probablement les germes de dendrites d'ordre $n+1$ qui n'ont pas poussé davantage (c'est-à-dire que sur les dendrites primaires, ces plaquettes sont les germes de dendrites secondaires ; sur des secondaires, il s'agit de germes de dendrites tertiaires, etc). Elles sont présentes sur des petites dendrites mais ne forment pas une organisation à deux dimensions suffisamment large pour agir comme des réseaux. Elles sont néanmoins bien facettées ce qui permet aux petites dendrites de réfléchir beaucoup la lumière et ainsi d'apparaître très brillantes sous le microscope, et de donner aux glaçures de ce type leur haute brillance d'un point de vue macroscopique.

D'autre part, des lames minces de BG-01, LHP-01 et LHP-02 ont été préparées par FIB pour effectuer des analyses en transmission. Pour BG-01, deux lames minces ont été préparées, une transverse par rapport à de grandes dendrites parallèles bien développées et une au milieu des petites dendrites moins développées afin de comparer leur composition chimique. Pour LHP-01 et LHP-02, une lame mince a été préparée sur chacun en coupant de manière transverse de grandes dendrites parallèles bien développées pour étudier leurs orientations relatives.

Les analyses STEM-EDS effectuées sur les deux lames de BG-01 ont confirmé la présence d'aluminium dans les dendrites, supposée précédemment grâce aux calculs des paramètres de maille effectués (cf. Figure 38).

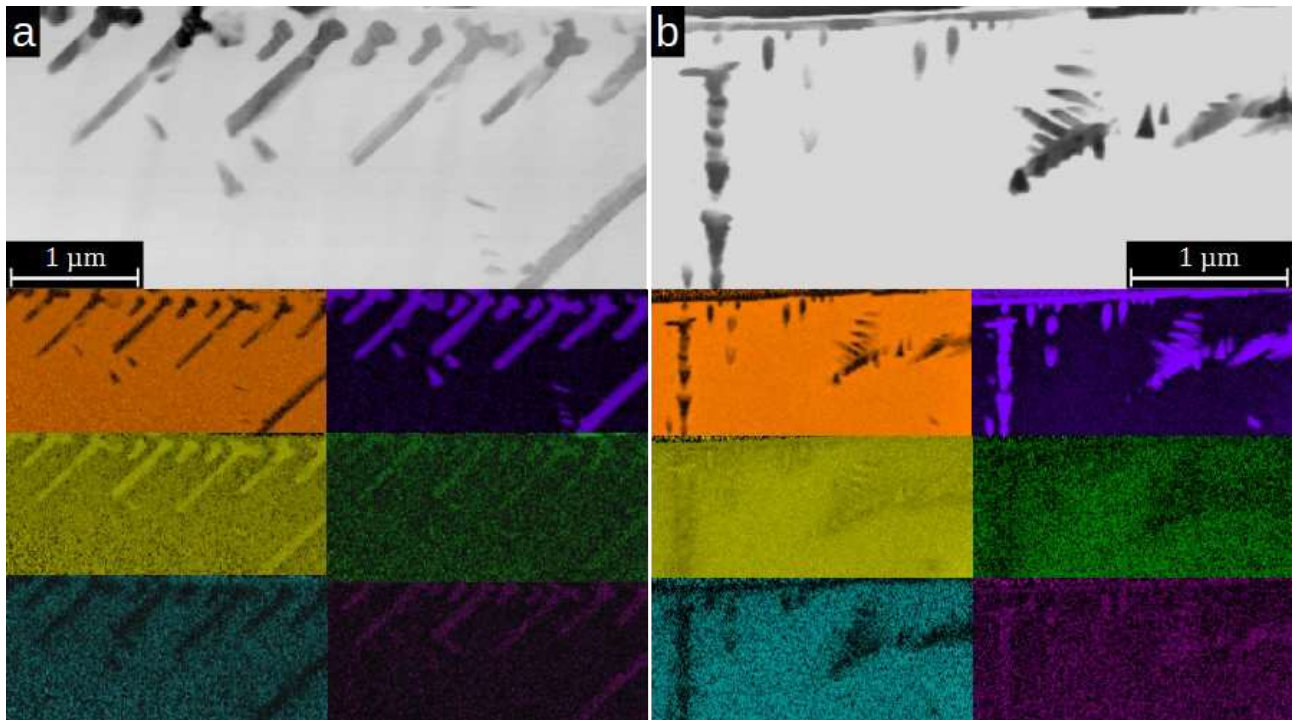


Figure 38 : Images STEM (200 kV, grossissement $\times 50000$ et $\times 70000$) des lames minces découpées sur les dendrites bien développées (a) et les petites dendrites (b) de BG-01 avec cartographies EDS associées (Si (orange), Al (jaune), Ca (cyan), Fe (violet), Mg (vert) et Ti (rose))

De plus, elles révèlent la présence de titane et de magnésium dans les dendrites [187]. Pour donner une idée un peu plus quantitative de ces substitutions, la moyenne (et l'écart-type entre parenthèses) des ratios entre les concentrations atomiques des différents cations avec les taux d'oxygène mesurés sur plusieurs points ont été calculés (cf. Tableau 8). L'oxygène a été choisi comme élément normalisant car il s'agit de l'élément majeur (entre 60 et 70 %at. sur les points de mesure) et que sa quantification par EDS est peu précise, étant un élément léger. Cela permet ainsi de donner une idée des proportions entre les différents éléments. Ils ont été multipliés par 100 par souci de lisibilité, le % indiqué en unité n'a donc ici qu'un sens mathématique.

Ratios élémentaires	Grandes dendrites	Petites Dendrites	Glaçure
Na/O	0,2 (0,2)	0,7 (0,4)	0,4 (0,2)
Mg/O	1,7 (0,3)	1,1 (0,2)	1,5 (0,3)
K/O	0,6 (0,3)	1,3 (0,4)	1,2 (0,4)

Ratios élémentaires	Grandes dendrites	Petites Dendrites	Glaçure
Ca/O	0,2 (0,2)	0,1 (0,1)	1,4 (0,2)
Ti/O	0,9 (0,1)	0,6 (0,2)	0,24 (0,06)
Al/O	13,6 (2,2)	11,0 (2,1)	9,3 (1,4)
Si/O	6,4 (2,9)	7,9 (3,8)	29,0 (1,8)
Fe/O	27,6 (3,0)	29,6 (5,3)	0,9 (0,3)

Tableau 8 : Ratios élémentaires moyens et écarts-types (%) mesurés sur différents les lames minces de BG-01 par STEM-EDS

En plus des éléments présentés dans le tableau ci-dessus, des traces de chrome et de manganèse ont également été détectées à des concentrations proches de la limite de quantification. Ces valeurs montrent que les mesures effectuées sur les cristaux sont toutes légèrement influencées par la glaçure, puisque les ratios Si/O et K/O de ces zones ne sont pas nuls et qu'il est peu probable que ces éléments substituent le fer dans la phase ϵ -Fe₂O₃. Malgré cette légère influence, ils permettent de confirmer les substitutions observées sur les cartographies élémentaires, en soulignant en outre que les substitutions en aluminium sont très importantes comparées aux deux autres. Par exemple, en normalisant par rapport aux proportions stœchiométriques de la phase ϵ -Fe₂O₃ (c'est-à-dire Fe+Al+Ti+Mg = 2), on obtient la formule moyenne de Fe_{1,26}Al_{0,62}Ti_{0,04}Mg_{0,08}O₃ sur les grandes dendrites, ce qui constituerait plutôt une solution solide entre ϵ -Fe₂O₃ et l'oxyde mixte de même structure FeAlO₃ dont l'existence est connue [201], avec des substitutions de titane et magnésium.

De plus, il semble que les taux de substitution par l'aluminium soit différents entre les grandes et les petites dendrites. En effet, le ratio Fe/Al vaut 2,1 en moyenne (avec un écart-type de 0,4) sur les grandes dendrites et 2,7 en moyenne (avec un écart-type de 0,7) sur les petites dendrites. Malgré les écarts-types relativement importants, cette différence suggère que les petites dendrites sont moins substituées que les plus grandes. Une telle conclusion ne peut pas être tirée sur les substitutions par le titane et le magnésium.

Les orientations de dendrites secondaires parallèles de différents échantillons archéologiques ont été effectuées par TKD (cf. Figure 39-a à c), une technique de diffraction électronique en transmission basée sur l'indexation de clichés de diffraction de Kikuchi, qui sont semblables à des bandes droites entremêlées découverts en 1928 [202] (cf. Figure 39-d). Cette technique permet de faire des cartographies à l'échelle sub-micronique de phases cristallines ainsi que d'orientation. Ayant fait ses preuves sur de plusieurs types de matériaux [203], il a été décidé dans cette étude de l'appliquer pour la première fois sur les céramiques du patrimoine.

Ces cartographies présentent de légères vibrations visibles notamment aux bordures des cristaux. Elles peuvent être dues par exemple à un jeu mécanique ou des variations cycliques de la température du système de refroidissement.

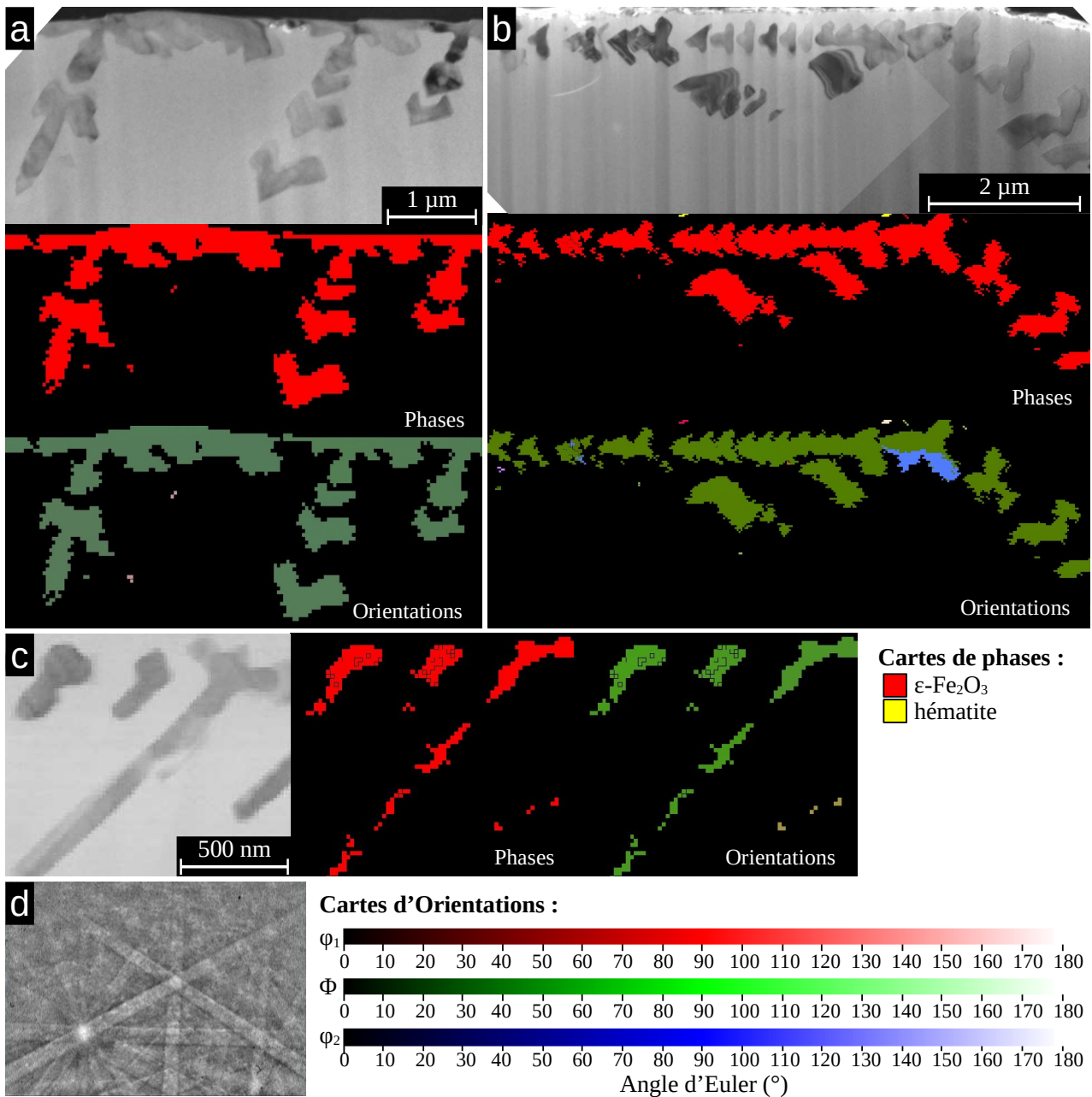


Figure 39 : Images TEM (BF, 200 kV, grossissements x6600 et x50000) des lames minces effectuées sur les dendrites développées de LHP-01 (a), LHP-02 (b) et BG-01 (c) et cartographies TKD de phase et d'orientation associées. Exemple de cliché TKD enregistré sur LHP-01 (d)

Tout d'abord, les cartographies de phases indiquent que toutes les dendrites présentes sur les trois lames sont composées de phase ϵ -Fe₂O₃. Quelques pixels situés dans la couche de protection de platine ont été identifiés comme de l'hématite sur LHP-02, il s'agit ainsi sûrement d'erreurs ponctuelles d'indexation. Les cartographies en orientation montrent que les cristaux de LHP-01 et BG-01 sont tous orientés dans la même direction. Cette direction est définie par le trio des angles d'Euler (φ_1 ; Φ ; φ_2) qui ont été estimés sur les cristaux de ces deux échantillons à environ (60° ; 86° ; 62,5°) et (52° ; 108° ; 22°) respectivement (des variations de l'ordre de 2 à 4° ont été observées entre différents pixels). Les orientations ont été déterminées avec des MAD (Mean Angular Deviation, qui donne une idée de la correspondance entre le cliché de diffraction expérimental et celui calculé par logiciel) de l'ordre de 0,2° à 0,5°, ce qui est tout à fait correct.

Certains pixels de BG-01 (ceux entourés de noir) possèdent cependant des MAD beaucoup plus importants, de l'ordre de $1,85^\circ$, ce qui suggère une mauvaise indexation pour ces pixels. Ces valeurs élevées de MAD peuvent-être dues à la superposition des lignes de Kikuchi de deux grains d'orientation différente.

Pour LHP-02, deux orientations sont visibles (indiquées en bleu et en vert sur les cartographies) dont les angles associés sont $(60^\circ ; 90^\circ ; 2^\circ)$ et $(60^\circ ; 90^\circ ; 179,9^\circ)$, deux orientations équivalentes à des sens d'axes près comme l'illustre la figure de pôle (cf. Figure 40). Cette différence est sans doute due au fait que l'orientation indiquée par le logiciel doit se trouver entre 0° et 180° pour la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ qui est orthorhombique. On peut donc conclure que ces dendrites n'ont également qu'une seule orientation.

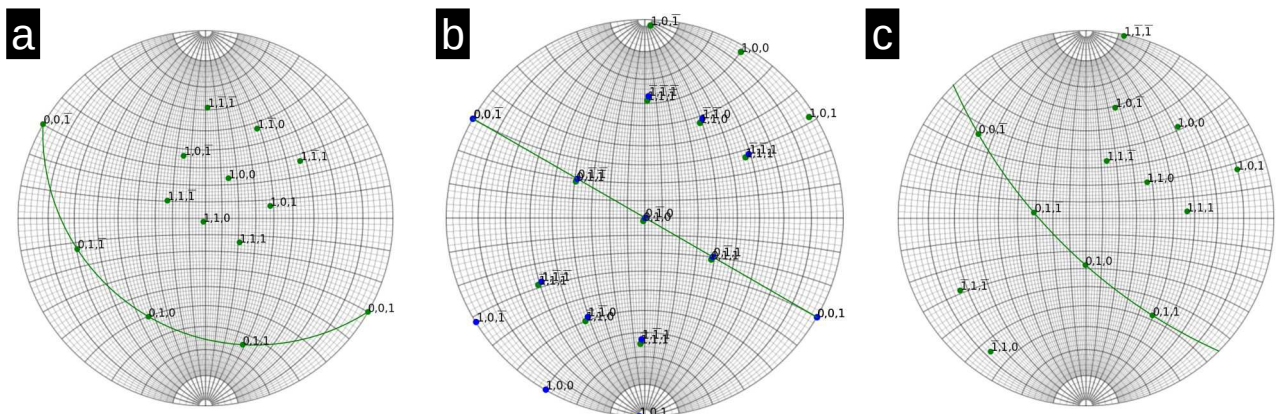


Figure 40 : Figures de pôle associées à l'orientation de la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ dans les dendrites de LHP-01 (a), LHP-02 (b) et BG-01 (c)

En comparant les orientations des dendrites entre différents échantillons, il apparaît qu'elles sont relativement proches en ordre de grandeur, avec l'axe $[0,1,0]$ plus ou moins normal au plan de découpe de la lame mince et le plan $(1,0,0)$ incliné d'environ 30° par rapport à la surface de la glaçure. Même si la variabilité semble relativement importante entre les échantillons, elle peut être tout à fait due à la préparation des lames : les surfaces des échantillons n'étant pas parfaitement plates et normales au support, la découpe des lames n'était probablement pas parfaitement normale à la surface de la glaçure, c'est pourquoi la tendance semble importante à noter malgré la forte variabilité. Un telle ressemblance entre les échantillons suggère que les mécanismes de croissance des dendrites sont très similaires quel que soit le site de production.

4) Caractérisation chimique

* Composition globale

Comme pour les pâtes, des analyses chimiques systématiques ont été effectuées par PIXE sur toutes les sections transverses. Les compositions moyennes sur toute l'épaisseur de la glaçure ont été obtenues en combinant les spectres de tous les pixels de la glaçure grâce au logiciel New-AGLAEMAP. Ces résultats sont présentés en Annexe 4 : Compositions élémentaires mesurées par PIXE, Tableau 20 page 262.

Les compositions en oxydes majeurs (SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3) obtenus sur les glaçures ne font pas ressortir les deux groupes d'échantillons distincts de manière aussi nette que celles des pâtes (cf. Figure 41).

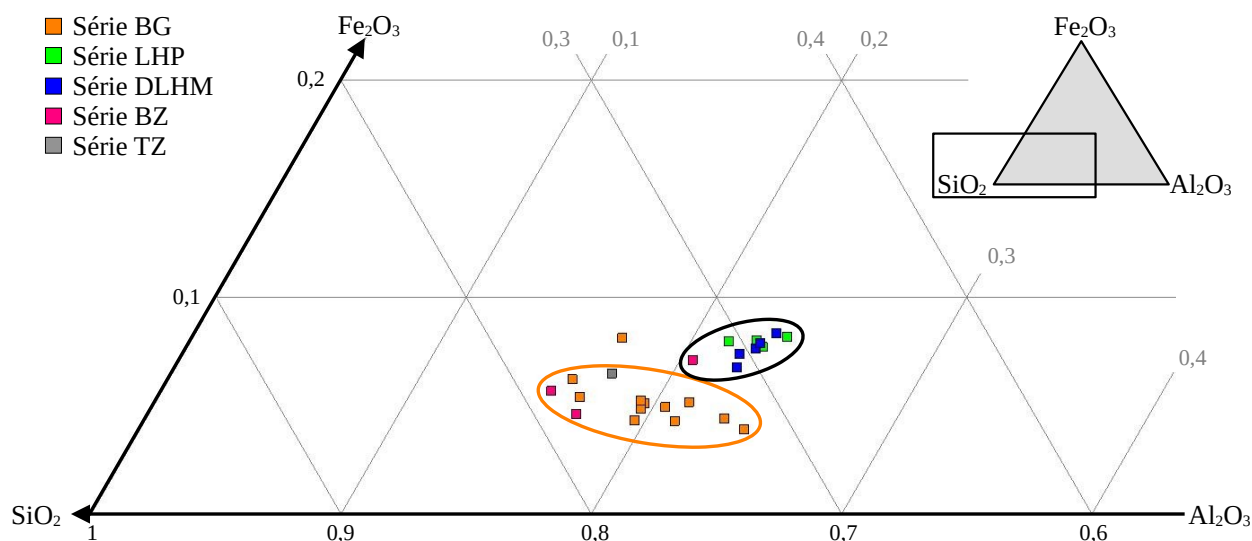


Figure 41 : Ternaire des majeurs (SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3) en proportion en poids d'oxyde de la composition des glaçures du corps

En regardant ce diagramme de manière un peu plus fine, il est possible de retracer ces deux groupes, mais ils comportent quelques différences par rapport à ceux établis avec les pâtes. Tout d'abord pour le groupe associé aux productions du Fújiàn (noir), l'échantillon BZ-01 se distingue légèrement par rapport aux autres avec son taux de silice de 63,7 % un peu plus élevé que les 60,6 % moyens (avec un écart-type de 1,0%) des autres échantillons de ce groupe.

Ensuite le groupe associé à la série BG (orange) englobe cette fois les échantillons TZ-28, BZ-02 et BZ-03, qui étaient hors des deux groupes car ils avaient des compositions de pâte très éloignées. De plus, l'échantillon BG-05 sort complètement de ce groupe, en particulier à cause de son taux d'oxyde fer très élevé à 7,1 % par comparaison aux autres échantillons de la série BG dont le taux moyen est de 4,4 % (avec un écart-type de 0,5 %). L'oxyde de fer ne constitue pas la seule différence entre BG-05 et les autres échantillons de la série BG, puisque ses concentrations en oxydes de sodium et de magnésium sont beaucoup plus faibles, respectivement proche de la limite de quantification du PIXE, soit inférieur à 0,1 %, contre 0,5 % en moyenne (avec un écart-type de 0,1 %) et à 0,9 % contre 1,8 % en moyenne (avec un écart-type de 0,3 %). Ses concentrations en oxydes de potassium et de titane sont en revanche beaucoup plus élevées, à respectivement 4,8 % contre 2,8 % en moyenne (avec un écart-type de 0,2 %) et 1,5 % contre 0,8 % en moyenne (avec un écart-type de 0,1 %).

L'étude des fondants utilisés (P_2O_5 , $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$, $\text{CaO}+\text{MgO}$) permet de faire réapparaître de manière très nette les deux groupes, qui semblent se répartir linéairement sur ce diagramme ternaire (cf. Figure 42).

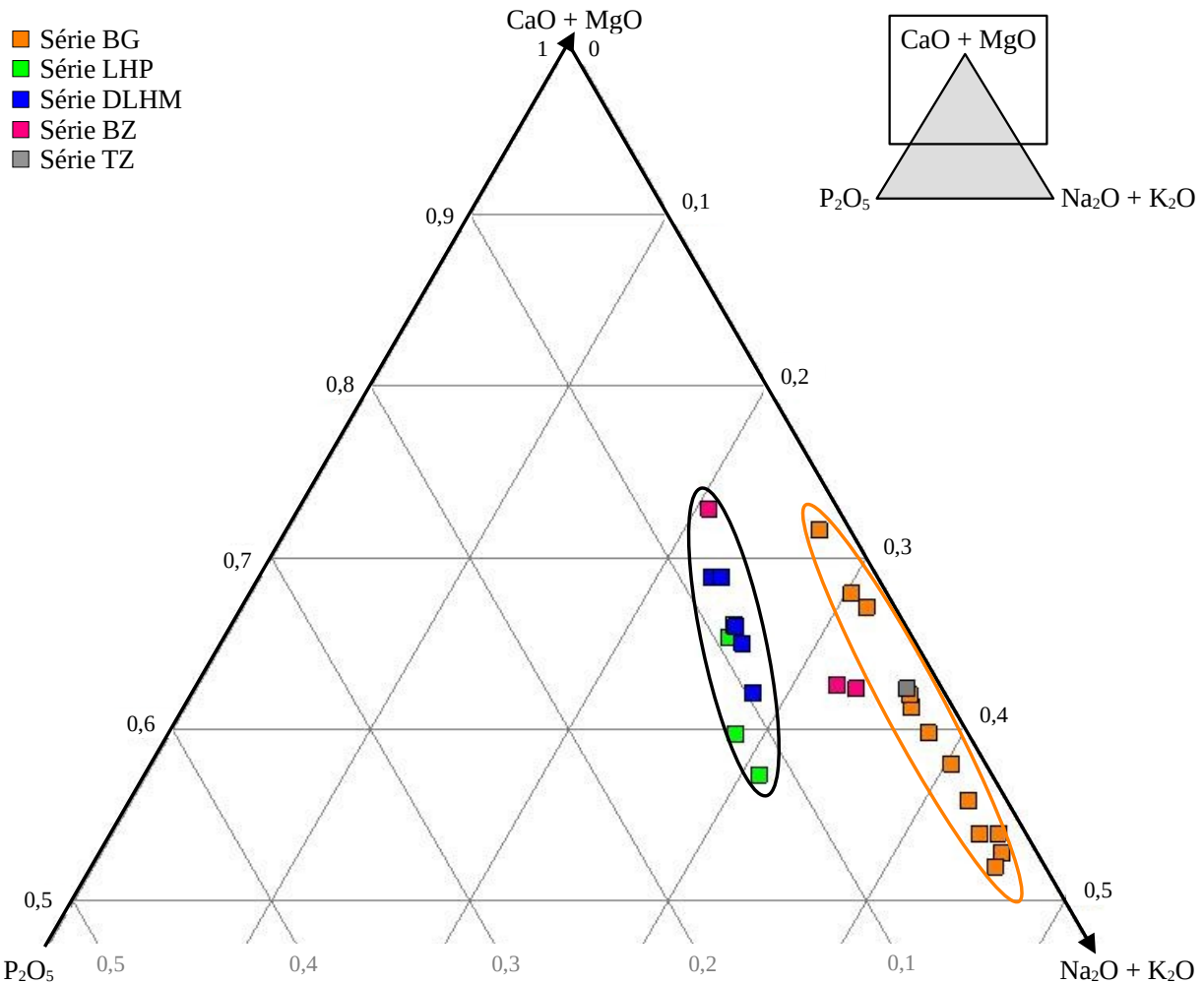


Figure 42 : Ternaire des fondants ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, $\text{CaO}+\text{MgO}$, P_2O_5) en proportion en poids d'oxyde de la composition des glaçures du corpus

Le taux d'oxyde de phosphore très faible des glaçures du groupe orange, associé au fait que la droite dessinée par les points représentant les échantillons semble parallèle à l'axe du binaire $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}/\text{CaO}+\text{MgO}$, suggère que les fondants éventuellement ajoutés à la matière première dans la formulation des glaçures ne contiennent pas de phosphore. Il s'agirait ainsi de fondants d'origine minérale, qui étaient peut-être présents directement dans la terre sélectionnée par les artisans. TZ-28 s'inscrit parfaitement dans ce groupe, suggérant que la formulation des glaçures entre les fours de Dìng et Yàozhōu est très similaire. Au contraire, le groupe noir associé aux productions du Fújiàn présente un taux d'oxyde de phosphore nettement plus élevé, ce qui suggère l'utilisation d'un fondant plus riche en cet élément, comme des cendres d'os ou végétales. Ces dernières constituent d'ailleurs l'hypothèse de fondant la plus soutenue par la littérature [31,45].

Enfin, sur BG-03 en particulier, des différences de composition importantes ont été relevées entre la glaçure noire et la glaçure brune, en particulier au niveau de l'alumine avec 16,4 % sur la glaçure noire et 21,0 % sur la glaçure brune. Des variations relativement importantes sur les oxydes de magnésium, calcium, fer et titane ont également été relevées. De telles différences n'ont pas été observées sur les autres échantillons, suggérant que celui-ci a été recouvert avec deux glaçures de composition différente pour obtenir ces deux couleurs.

* Stratigraphie et profil de composition

La littérature et les observations optiques montrant que les glaçures de la série BG sont constituées de deux couches : une superficielle fine et brune au-dessus d'une plus épaisse et foncée, des études complémentaires de la composition des glaçures en fonction de l'épaisseur ont été effectuées. Les compositions en oxyde obtenues en additionnant les spectres de tous les pixels à une même distance de la surface ont été tracées en fonction de la profondeur de la glaçure (cf. Figure 43). Ces études ont été ponctuellement complétées avec des observations par SEM sur quelques échantillons.

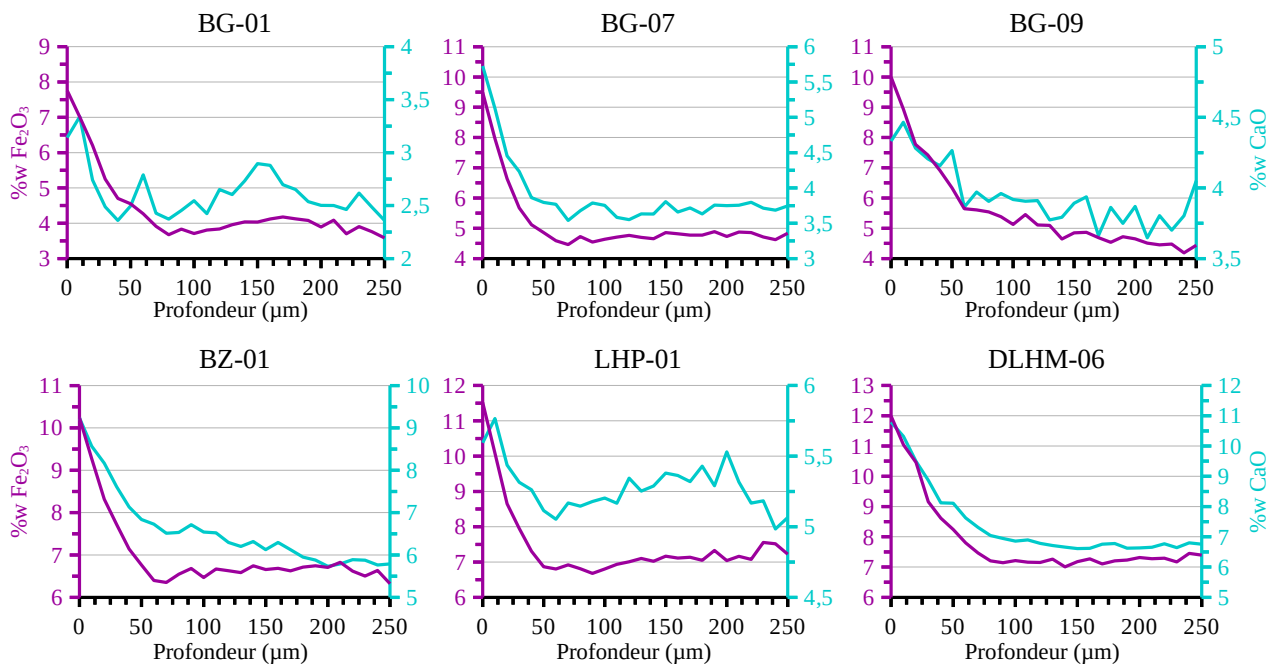


Figure 43 : Profils de composition en Fe₂O₃ (violet) et CaO (cyan) des glaçures de BG-01, BG-07, BG-09, BZ-01, LHP-01 et DLHM-06

La sélection de profils représentée montre un enrichissement en fer à l'approche de la surface des glaçures (cf. Figure 43-courbes violettes). Cet enrichissement se fait environ sur les premiers 50 μm, ce qui est cohérent avec l'épaisseur des couches superficielles brunes mesurées sur les sections transverses. Cette évolution du taux de fer semble corrélée positivement avec celle du calcium (cf. Figure 43-courbes cyanes), et corrélée négativement avec celles des oxydes majeurs, comme l'alumine et la silice, ce qui semble cohérent étant donné que les compositions sont bouclées à 100 %. Ces mêmes tendances similaires peuvent être observées sur les échantillons des autres séries, sauf LuhuWu, LHP-03 et DLHM-04.

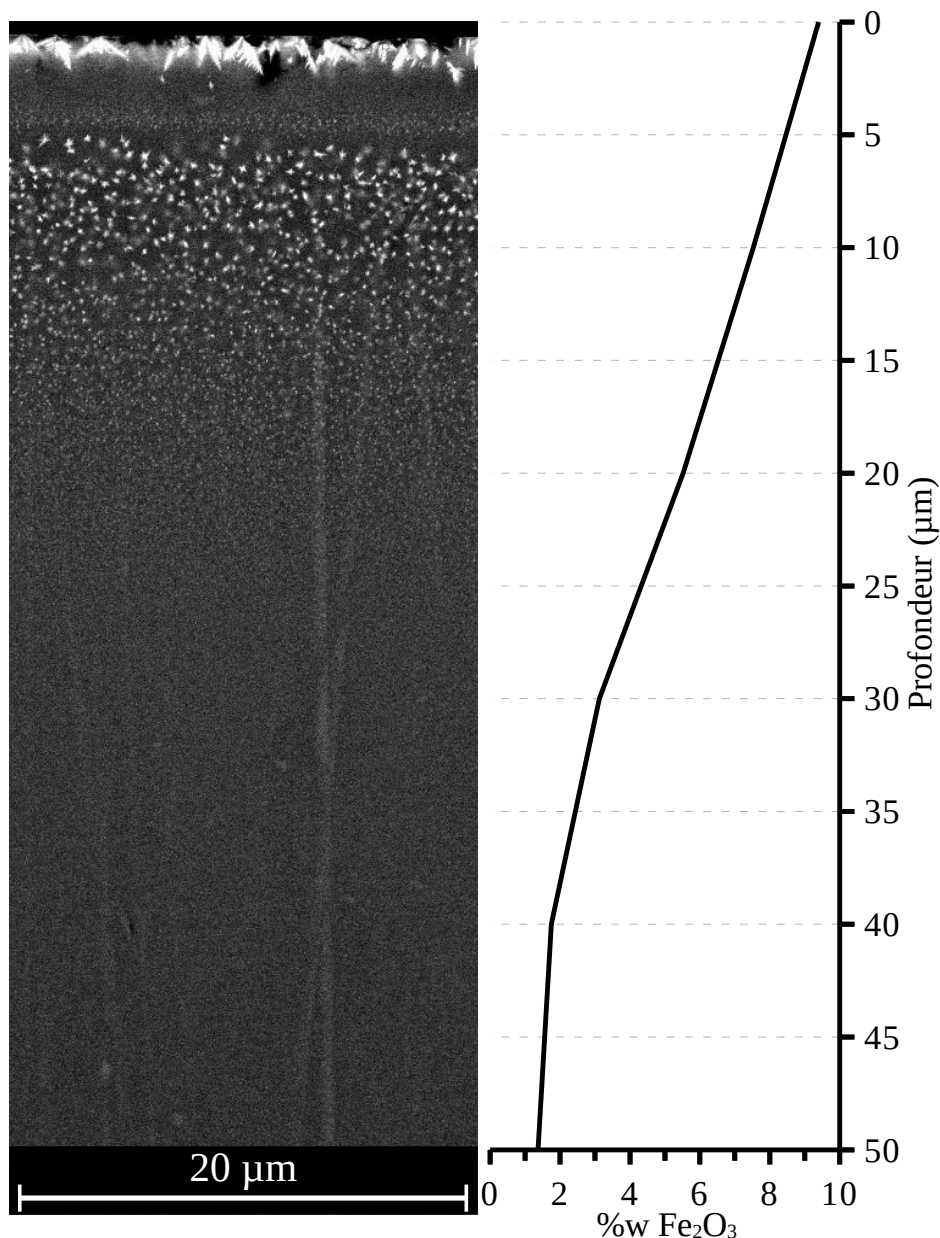


Figure 44 : Image SEM (BSE, 18 kV, grossissement x2500) de la section de BG-01 comparée à son profil de concentration en Fe₂O₃

En comparant ces observations avec les images obtenues en microscopie électronique, il apparaît que cette augmentation du taux d'oxyde de fer est due à des cristaux dendritiques. Ces cristaux sont répartis souvent en trois couches : une couche à la surface qui contient une grande densité de cristaux de plusieurs microns, une seconde possédant des cristaux beaucoup plus petits et moins densément répartis, et une troisième possédant des cristaux d'abord de taille intermédiaire, puis qui rétrécissent plus en profondeur. La résolution spatiale du PIXE est insuffisante pour faire apparaître les couches très en surface, mais elle montre la tendance : plus il y a de cristaux, plus le taux de fer est élevé. Des analyses par spectroscopie Raman effectuées sur ces couches ont montré il s'agit de cristaux de phase ϵ -Fe₂O₃ dans les deux premières couches, puis d'un mélange de phase ϵ -Fe₂O₃ et de spinelle dans la dernière [167,187].

5) Bilan

Les caractérisations optiques des glaçures du corpus archéologique ont permis de révéler que les zones brunes des différents échantillons sont parsemées de formations dendritiques micrométriques, pouvant parfois atteindre plusieurs dizaines de microns au niveau de défauts locaux.

Ces cristaux ont été identifiés par les analyses structurales comme de la phase ϵ -Fe₂O₃, phase caractéristique retrouvée sur toutes les productions noires et brunes la période Sòng. Elle est parfois associée à d'autres polymorphes ou oxydes riches en fer, comme de l'hématite, de la magnétite ou des spinelles mixtes (hercynite ou magnésioferrite par exemple). Certains cristaux, en particulier le zircon et la mullite, semblent favoriser sa croissance. Des calculs de structures ont montré que les paramètres de maille de cette phase dans les glaçures brunes sont légèrement plus faibles que ceux des références de la littérature, suggérant la présence de substitutions, confirmée par STEM-EDS. L'aluminium, le titane et le magnésium constituent les trois éléments substituants. L'aluminium en particulier est présent dans les dendrites en quantité très importante (rapport Fe/Al de l'ordre de 2/1 à 8/3), plus proche d'une solution solide entre ϵ -Fe₂O₃ et FeAlO₃ que d'une simple substitution. Son taux est toutefois plus faible dans les dendrites de taille inférieure.

Les analyses microstructurales par microscopie électronique ont montré que les dendrites sont très organisées à deux échelles. Tout d'abord des branches secondaires bien développées parallèles les unes aux autres poussent sur les longues branches avec un écart entre 200 et 250 nm. Ces grandes structures bi-dimensionnelles en peigne peuvent donc agir comme des réseaux en réflexion, expliquant l'aspect irisé des plus grosses dendrites en microscopie optique. Les cartographies d'orientations par TKD ont révélé que leurs orientations sont toutes identiques au sein d'un même échantillon, avec des tendances similaires entre les différents échantillons, suggérant un mécanisme de croissance très similaire. Les branches sont elles-mêmes composées de petites plaquettes décalées de 100 à 110 nm aux facettes bien définies, ce qui leur permet de bien réfléchir la lumière, expliquant l'aspect très brillant des glaçures.

Les analyses chimiques ont mis en évidence l'utilisation de techniques différentes entre les fours du Nord et du Sud, en particulier sur l'utilisation de fondants différents, probablement d'origine minérale pour les productions du Nord alors que ceux du Sud semblent être des cendres végétales. Indépendamment de leur composition globale, les analyses des profils de composition à la surface des glaçures ont montré un enrichissement en fer à la surface de presque tous les échantillons, dû à la présence de cristaux d'oxydes de fer dans la glaçure (ϵ -Fe₂O₃ proche de la surface et mélangé avec des spinelles plus en profondeur). Ces cristaux semblent être la cause de la couche superficielle brune observée dans les glaçures de Yàozhōu vu les épaisseurs mises en jeu. De plus, il semble qu'il existe une corrélation entre cet enrichissement en oxyde de fer avec un enrichissement en oxyde de calcium.

C – Interface entre la pâte et la glaçure

1) Caractérisation chimique globale

Les analyses PIXE des sections transverses et le tracé des profils ont également été l'occasion d'observer des phénomènes inattendus à l'interface entre la pâte et la glaçure des échantillons. En particulier, sur BG-02, BG-09 et BG-11, des couches riches en oxyde de calcium ont été identifiées à ces interfaces (cf. Figure 45-gauche).

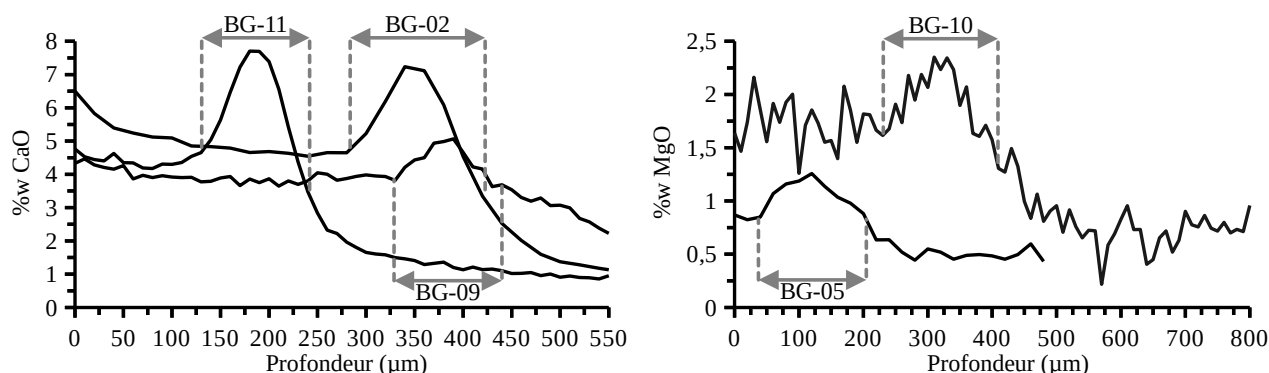


Figure 45 : Profils de composition EDS en CaO (gauche) de BG-02, BG-09 et BG-11, profils de composition en MgO (droite) de BG-05 et BG-10

Même s'il est tentant d'associer cette couche à l'engobe plus clair appliqué à l'interface avec la glaçure, ce dernier est présent sur la plupart des échantillons de la série BG, ce qui n'est pas le cas de la couche enrichie en oxyde de calcium. De plus, l'engobe étant constitué généralement de kaolin, il n'y a pas de raison qui expliquerait l'augmentation de la concentration de cet oxyde. De plus, même si BG-02 et BG-11 possèdent des taux d'oxyde de calcium assez élevés dans la série des échantillons BG, le taux d'oxyde de calcium de BG-09 de 4,0 % est inférieur à celui par exemple de BG-05 de 5,0 % sur lequel cette couche n'a pas été identifiée. Il semble ainsi qu'il n'y a pas de corrélation simple entre le taux d'oxyde de calcium et la présence de cette couche dans les glaçures.

De plus, une couche légèrement enrichie en magnésium a été détectée sur BG-05 et BG-10, mais des proportions bien inférieures à la couche riche en calcium (cf. Figure X-droite).

2) Caractérisation fine des interfaces

Afin de comprendre l'origine de ces couches, des analyses systématiques des interfaces de tous les échantillons de la série BG par SEM-EDS, complétées occasionnellement par des analyses structurales par XRD et spectroscopie Raman ont été effectuées. Les analyses SEM-EDS ont révélé que la couche riche en calcium est présente sur BG-02, BG-09, BG-11 en accord avec les données PIXE ainsi que sous la glaçure noire de BG-03 (cf. Figure 46).

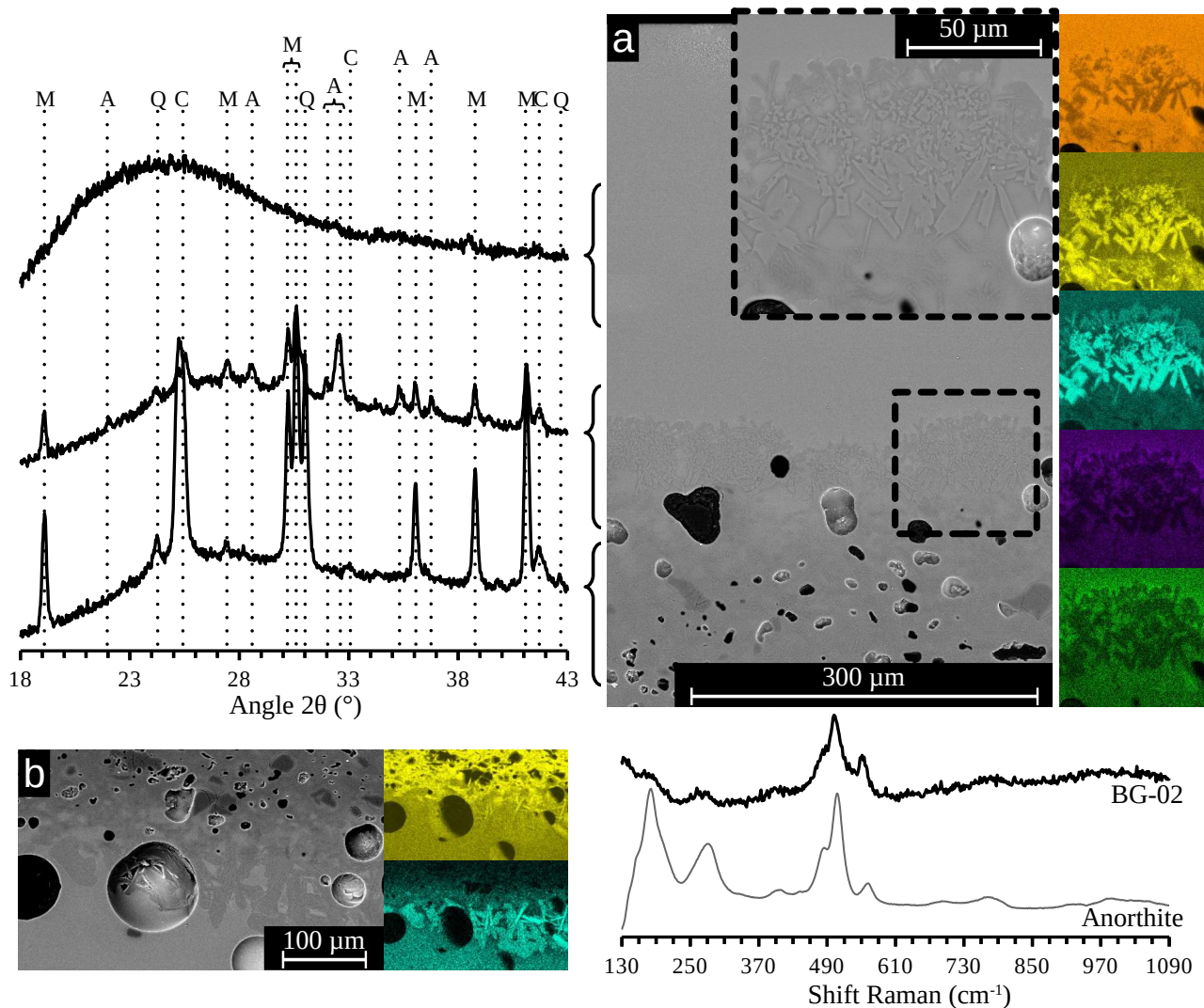


Figure 46 : Images SEM (BSE, 18 kV, grossissement $\times 200$) des sections de BG-02 (a) et de BG-03 (b) et cartographies EDS associées (Si (orange), Al (jaune), Ca (cyan), Fe (violet) et Mg (vert)). Diffractogrammes associés aux différentes couches et spectre Raman enregistré sur un cristal de l'interface de BG-02.

Il s'agit de cristaux riches en calcium, aluminium et silicium qui sont géométriques et présentent des structures en forme d'éventail du côté de la glaçure. Les analyses structurales ont révélé qu'il s'agit de cristaux d'anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), un feldspath stable à haute température [204] qui peut cristalliser à partir de phases vitreuses ayant une composition adaptée [205]. Ces analyses sont cohérentes avec les compositions mesurées en EDS, bien que les ratios entre les différents éléments ne soient pas retrouvés à cause du fait que le silicium et l'aluminium constituent les éléments principaux de la glaçure et de la pâte. Le fait que cette couche soit présente uniquement du côté de la glaçure noire de BG-03 qui possède un taux d'oxyde de calcium de 6,7 %, et non du côté de la glaçure brune dont le taux d'oxyde de calcium est de 4,9 % suggère que sa cristallisation nécessite une quantité minimale de calcium dans la glaçure pour se former. Cependant, comme évoqué précédemment, le fait qu'elle soit présente sur BG-09 dont le taux d'oxyde de calcium est inférieur par exemple à celui de la glaçure brune de BG-03 suggère que d'autres paramètres entrent en jeu dans sa cristallisation.

De plus, ces analyses ont également confirmé la présence de la couche riche en magnésium sur BG-05 et BG-10 (cf. Figure 47).

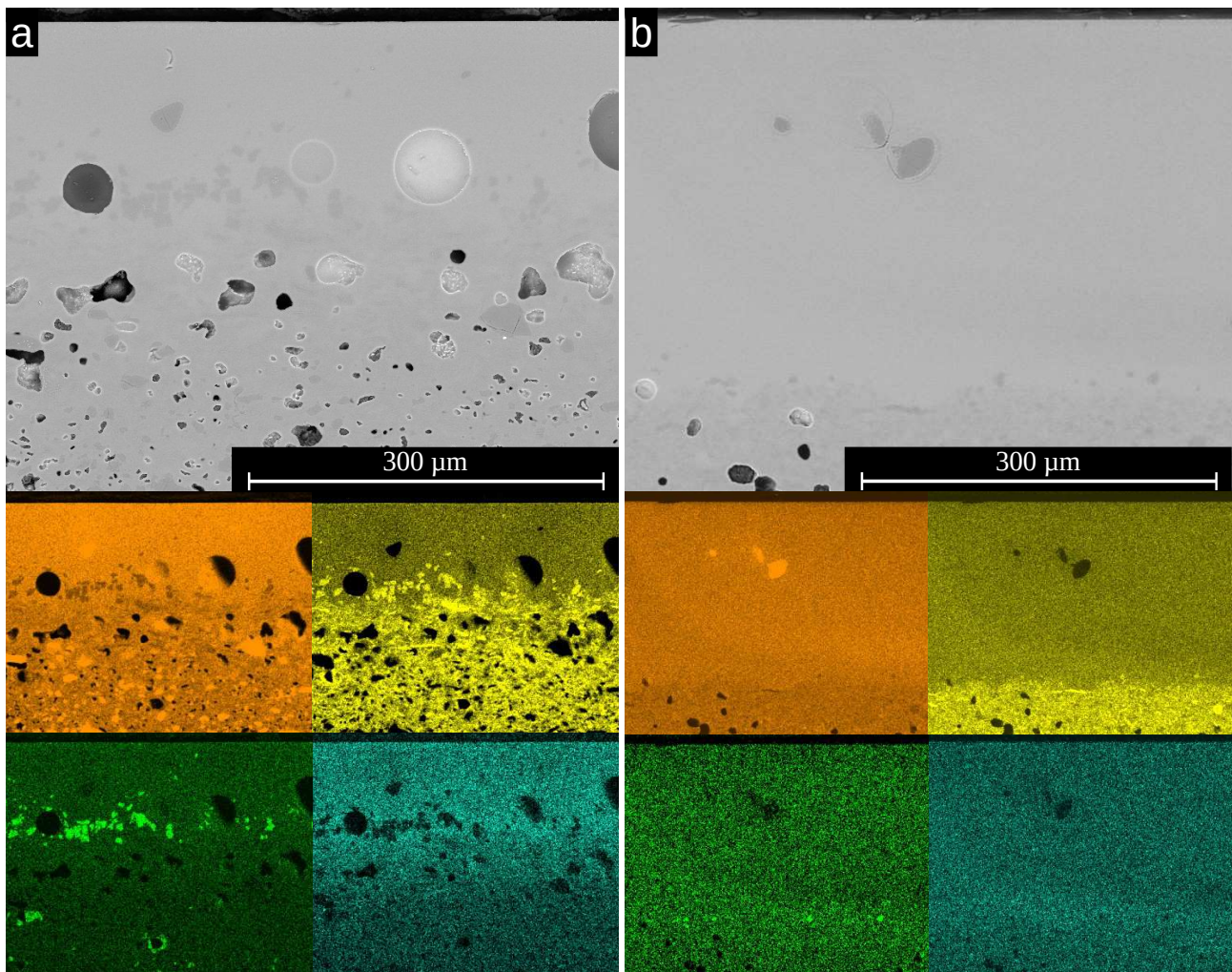


Figure 47 : Images SEM (BSE, 18 kV, grossissement x200) des sections de BG-05 (a) et BG-06 (b) et cartographies EDS associées (Si (orange), Al (jaune), Ca (cyan) et Mg (vert))

Cette couche est constituée de cristaux à la géométrie parallélépipédique ou hexagonale riches en magnésium, aluminium et silicium et contenant un peu de fer. De tels cristaux ont également été sporadiquement retrouvés aux interfaces de BG-06 (cf. Figure 47-b) et BG-08. Aucun lien évident entre la concentration en oxyde de magnésium globale mesuré par PIXE et la présence de cette couche ne peut être effectué. Ils ont été identifiés au vu de leur composition et des analyses par XRD sur BG-05 comme de l'indialite ou de la cordiérite ($Mg_2Al_4Si_5O_{18}$). Ces cristaux sont présents en grande quantité sur BG-05 et avaient déjà été caractérisés à sa surface.

Sur les autres échantillons de cette série (BG-01, BG-04, BG-07, BG-08 et la glaçure brune de BG-03) ainsi que ceux des autres séries, aucune couche spécifique à l'interface n'a été détectée.

3) Bilan

La caractérisation des interfaces entre la pâte et la glaçure a permis de faire ressortir la présence non systématique de couches enrichies, soit en magnésium, soit en calcium dans le bas de la glaçure des échantillons de la série BG. Ces enrichissements élémentaires sont associés à la présence de

cristaux d'indialite ou de cordiérite et d'anorthite respectivement. La comparaison de la présence des couches avec la composition globale des glaçures suggère que leur présence n'est pas directement liée à un excès significatif d'oxyde de magnésium ou de calcium dans les glaçures. Néanmoins, la présence de la couche riche en calcium sur BG-03 uniquement du côté de la glaçure au taux de calcium le plus élevé suggère qu'un taux plus important de cet élément favorise sa formation.

D – Objets de musée

1) Observations optiques

Les observations optiques à la loupe binoculaire effectuées sur place ont permis de sélectionner six bols dont les surfaces ont des aspects proches des tessons du corpus. Ces bols présentent en particulier tous des zones d'aspect brun de la couleur typiquement associée à la phase epsilon (cf. Figure 48).

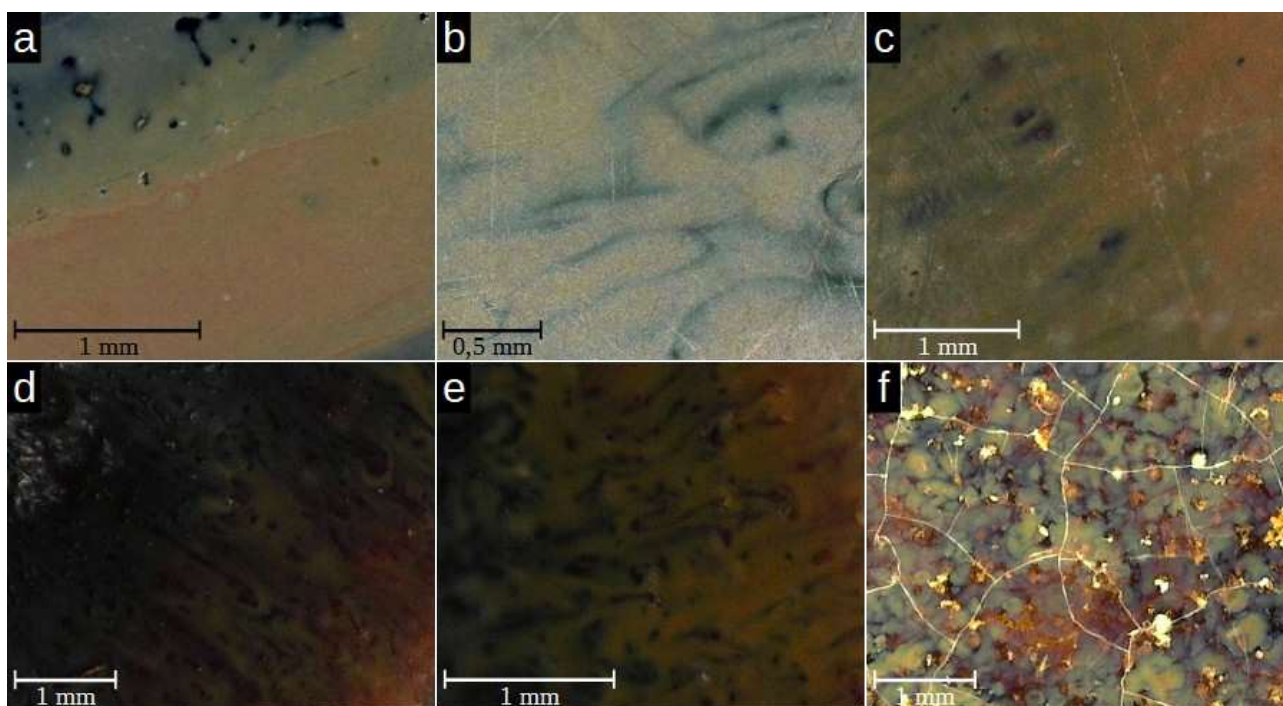


Figure 48 : Images optiques (grossissements $\times 30$ à $\times 60$) de la surface des bols 71.8.3 (a), 71.8.4 (b) des collections du musée Georges Labit et AT-2010-67-273 (c), AT-2010-67-302 (d), AT-2010-67-305 (e) et AT-2010-67-256 (f) des collections de l'abbaye de Belleperche

Les aspects de coulure remarqués sur les tessons de « fourrure de lièvre » sont présents sur les bols No. 71-8-3 (Labit) et AT-2010-67-273 (Belleperche) qui sont qualifiés dans les collections de « fourrure de lièvre », mais aussi sur les bols No. 71-8-4 (Labit) qualifié d'« écaille de tortue » et AT-2010-67-302 et AT-2010-67-305 (Belleperche) qui sont des bols à glaçure noire avec seulement la lèvre brune. Le bol AT-2010-67-256 possède des motifs bruns irréguliers plus proches de ceux de TZ-28, même si l'aspect translucide de la glaçure dessous rappelle davantage BZ-02.

2) Caractérisation structurale

La caractérisation structurale des glaçures a été effectuée par spectroscopie Raman, une technique d'analyse relativement simple à mettre en œuvre, pour laquelle la difficulté principale réside dans le positionnement des bols sous le faisceau laser pour obtenir des données correctes. Les analyses sur le bol AT-2010-67-256 n'ont malheureusement pas donné de résultats exploitables, la fluorescence étant trop importante sur cet objet. Cependant, les données obtenues sur les autres sont parfaitement exploitables et corroborent les analyses effectuées sur les tessons : la phase ϵ -Fe₂O₃ a été observée systématiquement sur les zones brunes de tous les objets, alors que son spectre est soit très peu intense, soit pas observé sur les zones noires (cf. Figure 49).

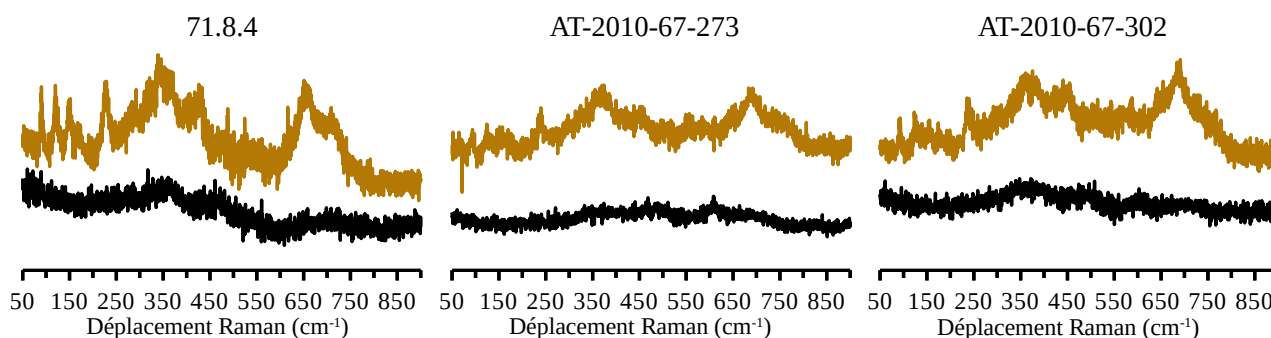


Figure 49 : Spectres Raman acquis sur les zones brunes (bruns) et noires (noirs) de 71.8.4, AT-2010-67-273 et AT-2010-67-302

Ces résultats confortent donc l'hypothèse du lien entre la couleur brune et la phase ϵ -Fe₂O₃. De plus, il s'agit de la première identification de cette phase sur un bol provenant des fours de Jízhōu.

Bilan global et problématiques émergentes

1) Bilan

Les caractérisations chimiques et structurales globales des pâtes et des glaçures ont permis d'apprécier la cohérence des séries d'échantillons composant le corpus étudié, en mettant en valeur les spécificités des productions des différents fours. Les fours du Fújiàn (séries DLHM et LHP) produisent des céramiques à pâte plutôt grossière, riche en oxyde de fer et pauvre en alumine, dont la glaçure est obtenue en mélangeant une matière première minérale avec des fondants riches en phosphore, sans doute des cendres végétales. Le four de Yàozhōu (série BG) produit des céramiques avec une pâte plus fine et chargée en alumine et utilise une glaçure contenant des fondants d'origine probablement minérale. Le four de Dìng (échantillon TZ-28) utilise des pâtes encore plus fines et plus chargées en alumines que celles de Yàozhōu et des glaçures très similaires. Les tessons retrouvés sur le site de Tiānmù sont beaucoup moins cohérents, avec BZ-01 qui présente beaucoup de similarités avec les échantillons du Fújiàn alors que BZ-02 et BZ-03 sont très différents de tous ceux des autres séries, avec leur pâte fine mais très riche en silice et pauvre en alumine.

Ces caractérisations ont également permis de mettre en évidence la relative variabilité de la série BG, avec en particulier BG-03 qui possède deux glaçures de composition très différente, et le groupe de BG-01 à BG-05 dont les pâtes ont une composition plus faible en alumine.

Par ailleurs, elles ont permis de confirmer la présence des formations dendritiques de phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ caractéristiques des productions Sòng, en particulier dans les zones brunes des tessons archéologiques et bols issus des collections de musées. Ces cristaux sont généralement micrométriques mais peuvent croître davantage, jusqu'à plusieurs dizaines de microns au niveau de défauts locaux, typiquement sur grains de zircon ou des aiguilles de mullite. Ils sont substitués, massivement par de l'aluminium, au point de se rapprocher d'une solution solide $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-AlFeO}_3$, et en plus faible quantité par du titane et du magnésium. Les structures dendritiques sont également très organisées à plusieurs échelles, ce qui leur permet de jouer le rôle de réseaux en réflexion qui confèrent à la glaçure sa grande brillance. Ces dendrites ont toutes la même orientation et poussent dans des directions similaires entre des échantillons issus de différents sites, suggérant que leur mécanisme de croissance est très comparable. Cette phase est parfois associée à d'autres espèces riches en fer, comme l'hématite, la magnétite, l'hercynite ou la magnésioferrite.

L'étude des profils de composition a en outre permis de faire ressortir d'une part un enrichissement en fer à la surface de presque tous les échantillons dû à la présence de la phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ proche de la surface et également à des spinelles plus en profondeur. Une corrélation avec le calcium semble également être visible en surface. D'autre part, elle a aussi révélé la présence occasionnelle de couches riches en anorthite et en indialite/cordiérite sur quelques échantillons de la série BG. La présence de la couche d'anorthite ne semble pas liée de manière évidente au taux d'oxyde de calcium de la glaçure, même si un taux d'oxyde de calcium plus important semble favoriser sa formation d'après les observations effectuées sur BG-03.

2) Problématiques

Ces analyses, en dévoilant de nouveaux phénomènes et en confirmant des tendances observées par d'autres études, ont soulevé plusieurs problématiques nouvelles à propos des productions noires et brunes de la dynastie Sòng. La sélection suivante de ces questions est explorée dans la suite de ce travail.

Tout d'abord le mécanisme de croissance de la phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ dans ces glaçures riches en fer est étudié, à travers d'une part la caractérisation de créations traditionnelles effectuées par des artisans contemporains, dont certaines ont été sorties du four au cours de la cuisson, d'autre part des expériences *in-operando* menées sur des matières premières utilisées par ces artisans ou ramassées sur les sites archéologiques présentées dans le Chapitre IV : Études en température et des créations.

Ensuite l'influence d'une sélection de paramètres de cuissons (atmosphère, durée d'étapes, matière première...) sur l'aspect visuel de la glaçure ainsi que des pré-traitements de la pâte sur l'interface pâte/glaçure sont présentés dans le Chapitre V : Étude de l'influence d'une sélection de paramètres environnementaux.

Chapitre IV : Études en température et des recreations

A – Caractérisation des matières premières

Cette partie présente la caractérisation chimique et structurale des matières premières Jish1, Fuj1 et Fuj2. Pour des données plus générales (provenance, aspect brut...), se référer au Chapitre II, B, 4) Matières premières page 65

1) Observations optiques

Afin de comparer visuellement l'aspect des matières premières en s'affranchissant des biais géométriques dus à la morphologie des fragments de roche, les observations optiques présentées ici ont été effectuées sur les échantillons mis en poudre et dans des conditions d'éclairage identiques (cf. Figure 50).

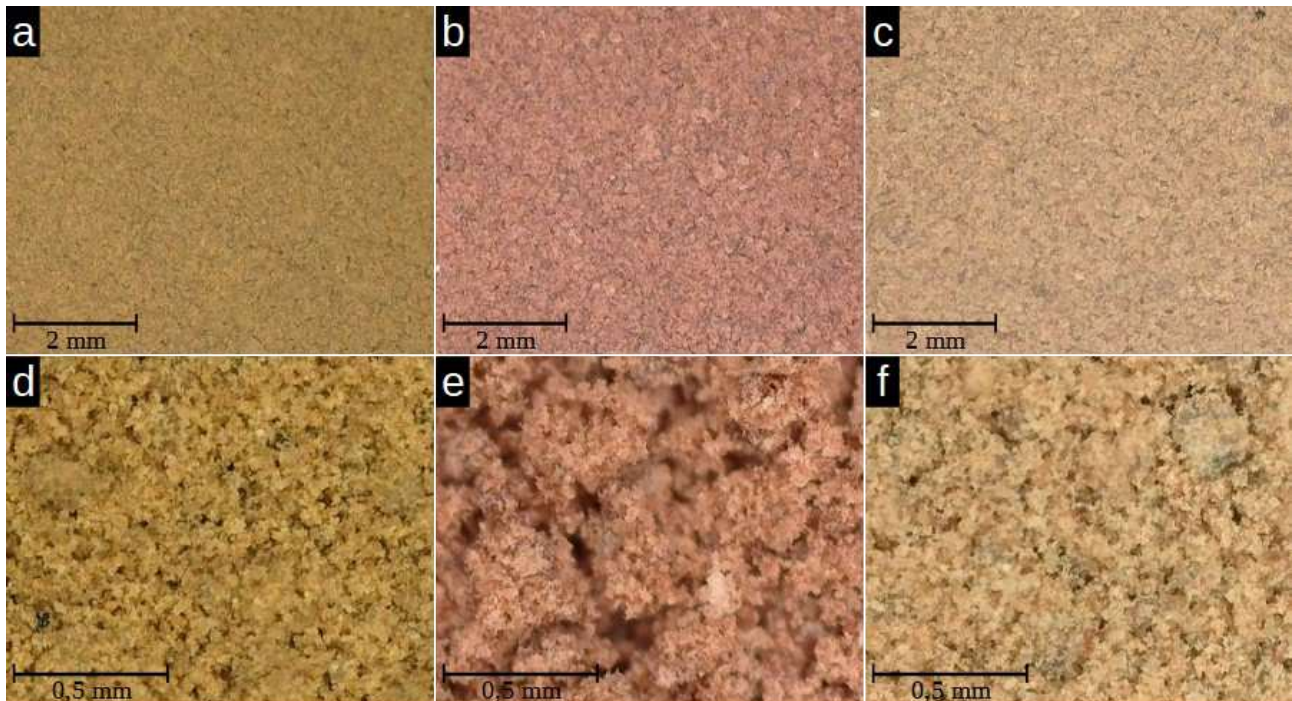


Figure 50 : Images optiques (grossissements x20 et x100) de Jish1 (a et d), Fuj1 (b et e) et Fuj2 (c et f)

Ces images montrent que la couleur globale de ces matières crues est très différente, plutôt jaune ocre pour Jish1, rouge pour Fuj1 et beige brun pour Fuj2. Les prises de vues à plus forts grossissements suggèrent que Jish1 et Fuj2 sont plus faciles à réduire en poudre fine et que leurs grains s'agglomèrent moins que Fuj1, qui présente des amas de plusieurs centaines de microns.

2) Caractérisation chimique

La caractérisation chimique des matières premières a été effectuée par EDS sur cinq zones différentes de poudre. Les résultats moyens (avec les écarts-types entre parenthèses) de ces analyses sont indiqués dans le Tableau 9 ci-dessous.

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	CuO	Total
Jish1	1,3 (0,1)	2,45 (0,07)	18,9 (0,4)	60,7 (0,4)	0,17 (0,05)	0,17 (0,09)	3,5 (0,1)	2,02 (0,2)	1,1 (0,1)	0,15 (0,03)	9,3 (0,1)	0,3 (0,1)	99,62
Fuj1	0,9 (0,2)	3,1 (0,2)	16,9 (0,3)	65,5 (0,4)	0,12 (0,01)	0,4 (0,4)	5,6 (0,2)	0,66 (0,06)	0,56 (0,06)	0,11 (0,02)	6,0 (0,4)	0,26 (0,08)	99,75
Fuj2	1,2 (0,1)	3,6 (0,1)	19,1 (0,3)	54,6 (0,6)	0,25 (0,07)	0,14 (0,06)	4,22 (0,1)	8,4 (0,6)	0,83 (0,09)	0,13 (0,04)	7,4 (0,2)	0,24 (0,04)	100,11

Tableau 9 : Composition moyenne (et écart-type) en %w d'oxyde des matières premières mesurée par EDS

Ces matières possèdent des compositions adaptées pour être utilisées comme des glaçures pour céramiques cuites à haute température sans ajout très conséquent d'autres matières, grâce à leurs taux de fondants relativement hauts (en particulier Fuj2 dont le taux de chaux est très supérieur aux deux autres). Elles sont néanmoins relativement différentes des compositions mesurées sur les glaçures archéologiques, probablement à cause à la fois des pertes thermiques et de l'ajout d'autres matières comme des cendres végétales par les artisans Sòng. Le taux d'oxyde de fer est élevé, variant entre 6,0 à 9,3 %w, confirmant qu'il s'agit bien de l'élément colorant principal.

Quelques pointés ont également été effectués sur des cristaux isolés. Ceux-ci ont mis en valeur des cristaux ne contenant que du silicium et de l'oxygène, probablement des grains de quartz, des aluminosilicates riches en sodium de proportions Na:Al:Si proches de 1:1:3 typique de l'albite (NaAlSi₃O₁₀) ou encore des aluminosilicates riches en magnésium, fer et en potassium avec un ratio Al:Si de l'ordre de 2:3 qui pourrait bien correspondre à de l'illite ou de la muscovite (K(Al,Mg,Fe)₂AlSi₃O₁₀(OH)₂). Un grain de monazite ((La,Ce)PO₄) a également été détecté dans Jish1.

3) Caractérisation structurale

Afin de compléter la caractérisation chimique par EDS, des caractérisations structurales par XRD et spectroscopie Raman ont été effectuées (cf. Figure 51).

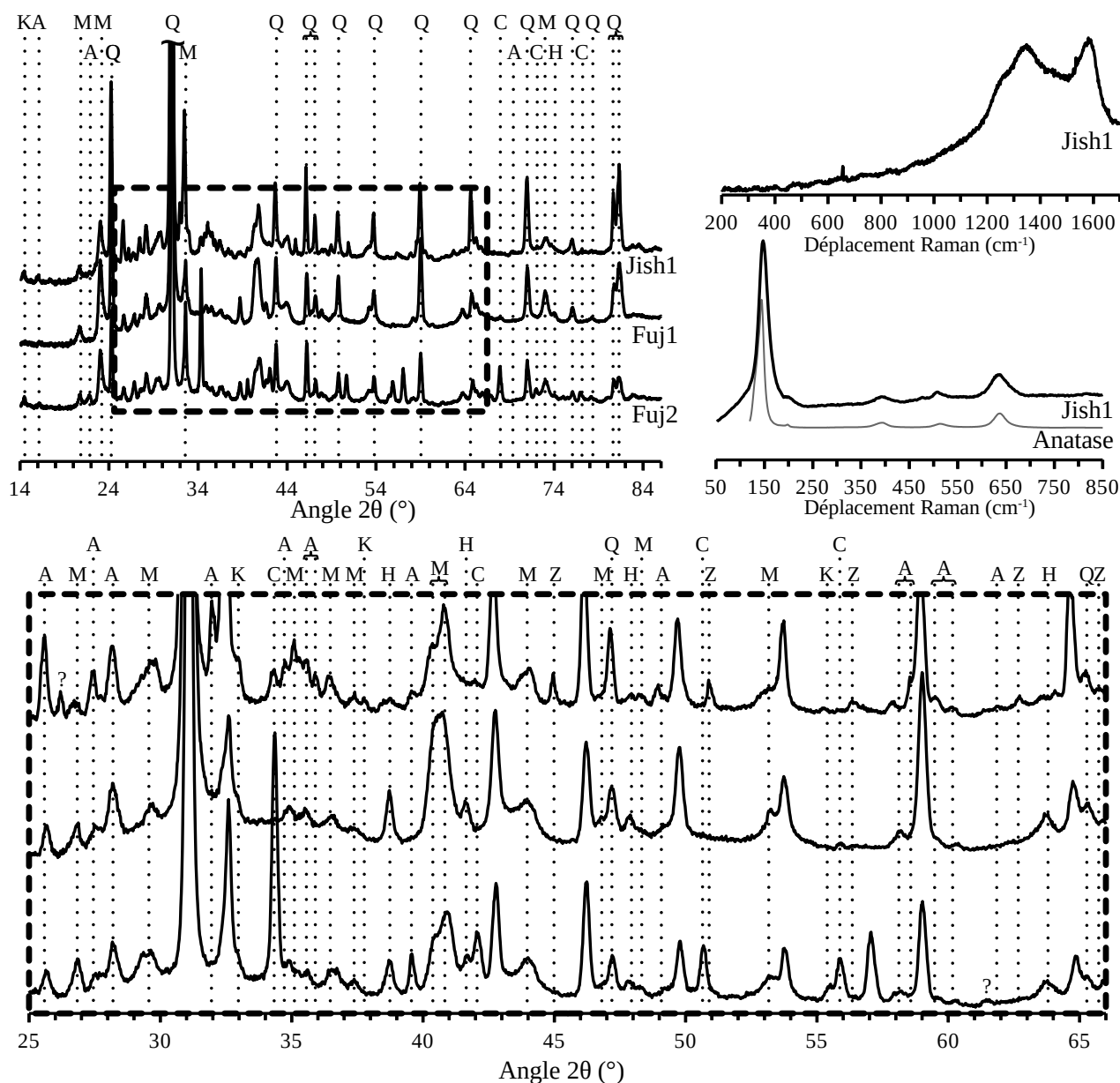


Figure 51 : Diffractogrammes enregistrés sur les matières premières et détail de l'intervalle 25 - 66° avec indexation des pics (A = albite, C = calcite, H = hématite, K = kaolinite, M = muscovite/illite, Q = quartz et Z = zircon), exemples de spectres Raman de carbone et d'anatase

Ces analyses ont confirmé la présence de quartz, d'albite et d'illite ou muscovite (les deux composés ont des pics très proches) observés en EDS. De plus, elles ont révélé la présence d'autres espèces cristallines, comme de la kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), de la calcite (CaCO_3), de l'hématite (Fe_2O_3), du zircon (ZrSiO_4) et de l'anatase (TiO_2). De la matière organique a également été trouvée en spectroscopie Raman grâce au spectre Raman du carbone (cette matière a été carbonisée par le

laser). La diffraction par rayonnement synchrotron a confirmé la présence de ces phases et a également permis d'identifier de la chlorite $((\text{Fe,Mg,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8)$, de la dolomite $(\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2)$ et de la montmorillonite $(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ en faible quantité. Cependant, ces diagrammes ont les pics du quartz et de la calcite disproportionnés par rapport à ceux obtenus en laboratoire, suggérant une ségrégation de la matière première lors de la mise en capillaire.

B – Étude des éprouvettes de la série ZJ

L'étude en température lors d'une cuisson traditionnelle a été effectuée avec la série d'éprouvettes ZJ, fabriquée par Ren Shuanmin, artisan qui travaille actuellement sur la recreation des glaçures brunes typique de Yàozhōu. La glaçure de ces huit échantillons a été fabriquée à partir de la matière première Jish1. Le cycle thermique auquel ils ont été soumis a une montée en température divisée en trois étapes. D'abord une montée assez rapide est effectuée sous atmosphère oxydante. Ensuite, une montée plus lente sous atmosphère plus réductrice est réalisée, au cours de laquelle les échantillons ZJ-01 et ZJ-02 ont été sortis du four, à respectivement 1220°C et 1240°C. Enfin, l'atmosphère devient faiblement oxydante jusqu'à atteindre 1320°C. C'est pendant cette étape que les échantillons ZJ-03 à ZJ-06 sont sortis du four, respectivement à 1280°C, 1300°C, 1310°C et 1320°C. La température est maintenue à 1320°C pendant 30 minutes puis la descente est effectuée jusqu'à température ambiante sous la même atmosphère. ZJ-07 est sorti du four à 1160°C pendant la descente et ZJ-08 après le refroidissement complet. Pour plus détails sur le cycle thermique, se référer au Chapitre II, B, 3) Éprouvettes tests artisanales modernes page 64.

1) Observations optiques et caractérisation structurale globale

Les observations effectuées par microscopie optique sur cette série d'éprouvettes montrent clairement que les échantillons ZJ-01 à ZJ-06 sont relativement similaires alors que ZJ-07 et ZJ-08 se distinguent complètement des autres (cf. Figure 52).

La principale différence entre les échantillons ZJ-01 à ZJ-06 est que la matrice vitreuse occupe une surface plus importante dans les échantillons ZJ-n avec des n supérieurs. Cette observation est cohérente, puisque les ZJ-n avec des n supérieurs ont été sortis du four plus tard dans le cycle thermique : la matière première a donc eu plus de temps pour fondre. Ils possèdent tous également des cristaux hexagonaux. Leur similarité est aussi soulignée par les analyses XRD. En effet, ces six échantillons possèdent des diagrammes très similaires avec du quartz et de l'indialite (ou cordiérite) principalement. Cette dernière est probablement associée aux cristaux hexagonaux, par ressemblance avec BG-05 dont les cristaux de cette morphologie ont été identifiés comme tels. Les intensités de ces pics sont assez variables selon les échantillons, probablement à cause de l'hétérogénéité locale. De l'hercynite est également identifiée sur ZJ-01 et ZJ-02, probablement issue d'une transformation de la matière première lors de la montée en température sous conditions réductrices [206]. Les pics associés à cette phase s'écrasent progressivement et ne sont plus visibles sur les échantillons suivants, peut-être car l'apport partiel en oxygène et la montée en température favorisent sa dissolution dans la matrice vitreuse.

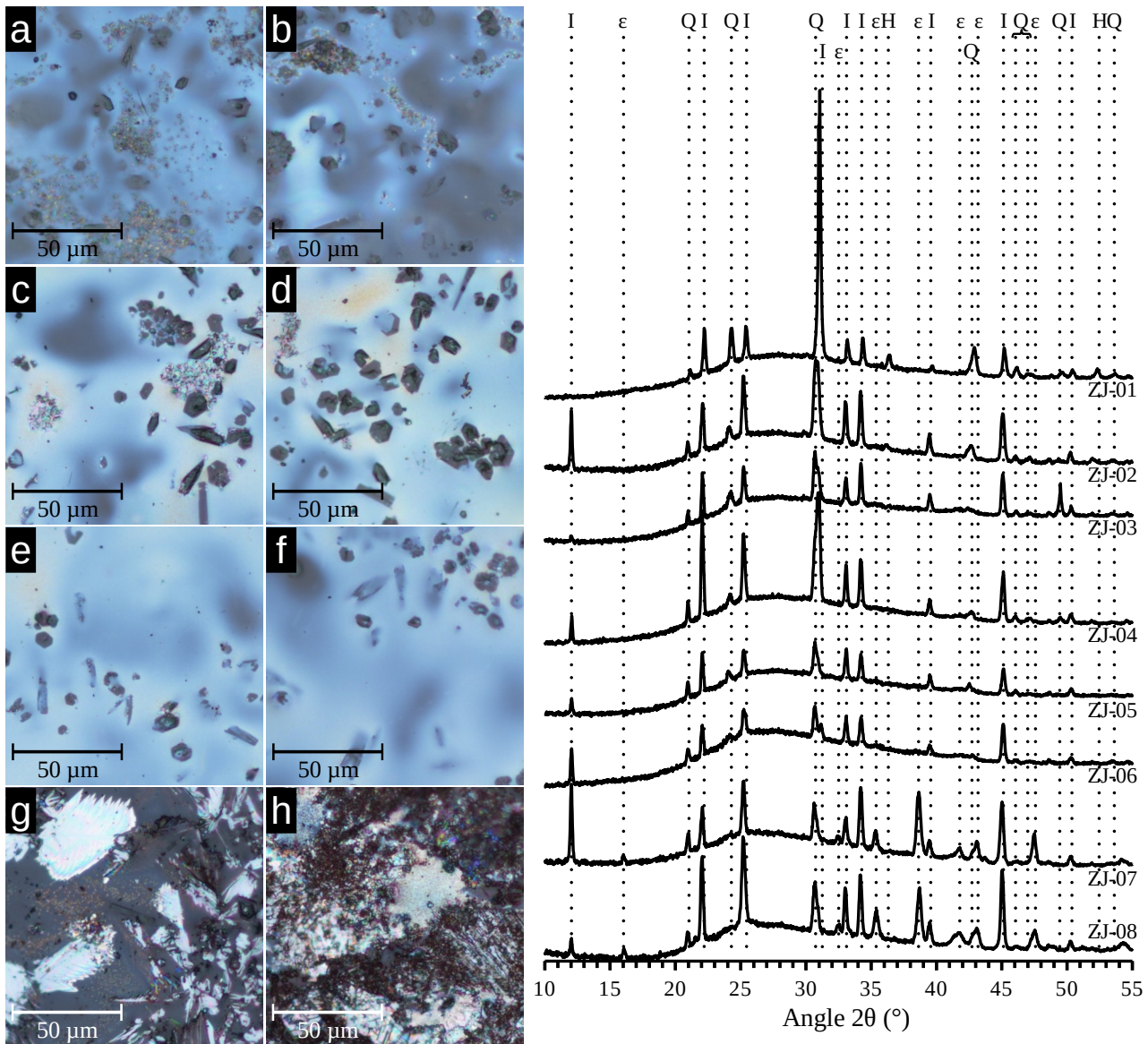


Figure 52 : Images optiques (grossissement $\times 200$) de ZJ-01 (a), ZJ-02 (b), ZJ-03 (c), ZJ-04 (d), ZJ-05 (e), ZJ-06 (f), ZJ-07 (g) et ZJ-08 (h) et diffractogrammes associés avec identification des pics (ϵ = phase ϵ -Fe₂O₃, H = hecynite, I = indialite et Q = quartz)

ZJ-07 est, quant à lui, très différent des échantillons précédents : il présente des structures dendritiques de plusieurs dizaines de microns qui apparaissent irisées, très similaires à l'aspect des gros cristaux de phase ϵ -Fe₂O₃ observés sur les échantillons archéologiques. D'autres cristaux de forme plus géométrique et irisés sont également présents en surface, ainsi que des zones plus homogènes avec de petits cercles micrométriques. À cause de la brillance de ces cristaux, la partie vitrifiée apparaît plus foncée que sur les échantillons précédents, ce qui rend moins visibles les cristaux hexagonaux qui sont encore présents. Son diffractogramme présente notamment les pics caractéristiques de la phase ϵ -Fe₂O₃, suggérant que les dendrites irisées sont effectivement constituées de cette phase.

Enfin, ZJ-08 présente quelques similarités avec ZJ-07 (notamment les cristaux dendritiques irisés), cependant il semble recouvert en surface de petits cristaux rougeâtres. Son diffractogramme est très ressemblant à celui de ZJ-07, avec comme seule différence notable un léger épaulement sur

le pic associé à la phase ϵ -Fe₂O₃ à 47,3° pouvant éventuellement être associé à la présence d'hématite.

La présence de la phase ϵ -Fe₂O₃ observée par XRD uniquement sur les échantillons pris lors de la descente en température confirme que cette phase cristallise effectivement pendant l'étape de refroidissement, comme plusieurs études l'avaient conjecturé [98,99,165].

2) *Caractérisation structurale et chimique locale*

La série de recréation constituant une base adaptée pour documenter la cristallisation des dendrites de phase ϵ -Fe₂O₃ dans les glaçures riches en fer, une caractérisation locale plus fine a été effectuée par spectroscopie Raman sur l'ensemble des échantillons (surfaces et sections) puis par SEM-EDS sur les échantillons ZJ-01 et ZJ-06 à ZJ-08.

Les analyses par spectroscopie Raman ont permis de confirmer la présence de gros grains de quartz isolés dans les glaçures de tous les échantillons et l'identification des cristaux hexagonaux comme de l'indialite ou de la cordiérite (cf. Figure 53).

Le spectre semble plus proche de l'indialite au vu du pic unique à 250 cm⁻¹ au lieu d'un doublet mais plus proche de la cordiérite au vu du pic unique vers 970 cm⁻¹ au lieu d'un triplet. Cependant, les spectres présentant souvent un deuxième des pics de ce triplet, cela suggère plutôt une identification comme de l'indialite. Des analyses EDS complémentaires menées sur ces cristaux ont montré qu'ils contiennent du fer.

Ces analyses ont également permis d'identifier du zircon sur plusieurs échantillons, ainsi que des gros grains de différents oxydes de titane comme de l'anatase (TiO₂), du rutile (TiO₂) ou d'oxyde mixte fer/titane comme de la pseudobrookite (Fe₂TiO₅). La présence d'anatase sur ZJ-03 et de rutile sur ZJ-01 et ZJ-02, qui ont été sortis du four à une température plus basse que ZJ-03, montre que la transformation de l'anatase en rutile ne s'opère pas toujours dans ce genre de système, comme suggéré dans le chapitre précédent suite à l'observation d'anatase dans la glaçure de DLHM-36. Comme le rutile, la pseudobrookite provient de la transformation de l'anatase, possible dans cet environnement riche en fer qui permet sa formation [207].

Pour ce qui est des oxydes de fer, des zones larges parsemées de petits cristaux brillants et quelques germes irisés ont été observés à proximité des cristaux d'indialite dans les échantillons ZJ-01 à ZJ-06. Les spectres Raman obtenus sur ces cristaux sont typiques des spinelles et peuvent être répartis en deux familles en fonction de la position de leur pic principal : centré autour de 681 cm⁻¹ en moyenne (avec un écart-type de 4 cm⁻¹) et autour de 731 cm⁻¹ en moyenne (avec un écart-type de 8 cm⁻¹), avec quelques assez rares spectres intermédiaires. Ces positions variées ont été observées sur chaque échantillon, sans tendance particulière, comme en attestent les trois spectres enregistrés sur ZJ-02. Ces valeurs se situent entre celles des pics principaux des spinelles riches en fer connus (autour de 670 cm⁻¹ pour la magnétite, 700 cm⁻¹ pour la maghémite et 750 cm⁻¹ pour l'hercynite) [208,209]. Ainsi, il s'agit vraisemblablement de spinelles intermédiaires entre ces phases, plutôt proche de la magnétite pour ceux dont le pic principal est autour de 681 cm⁻¹ et de l'hercynite pour ceux dont le pic est autour de 731 cm⁻¹.

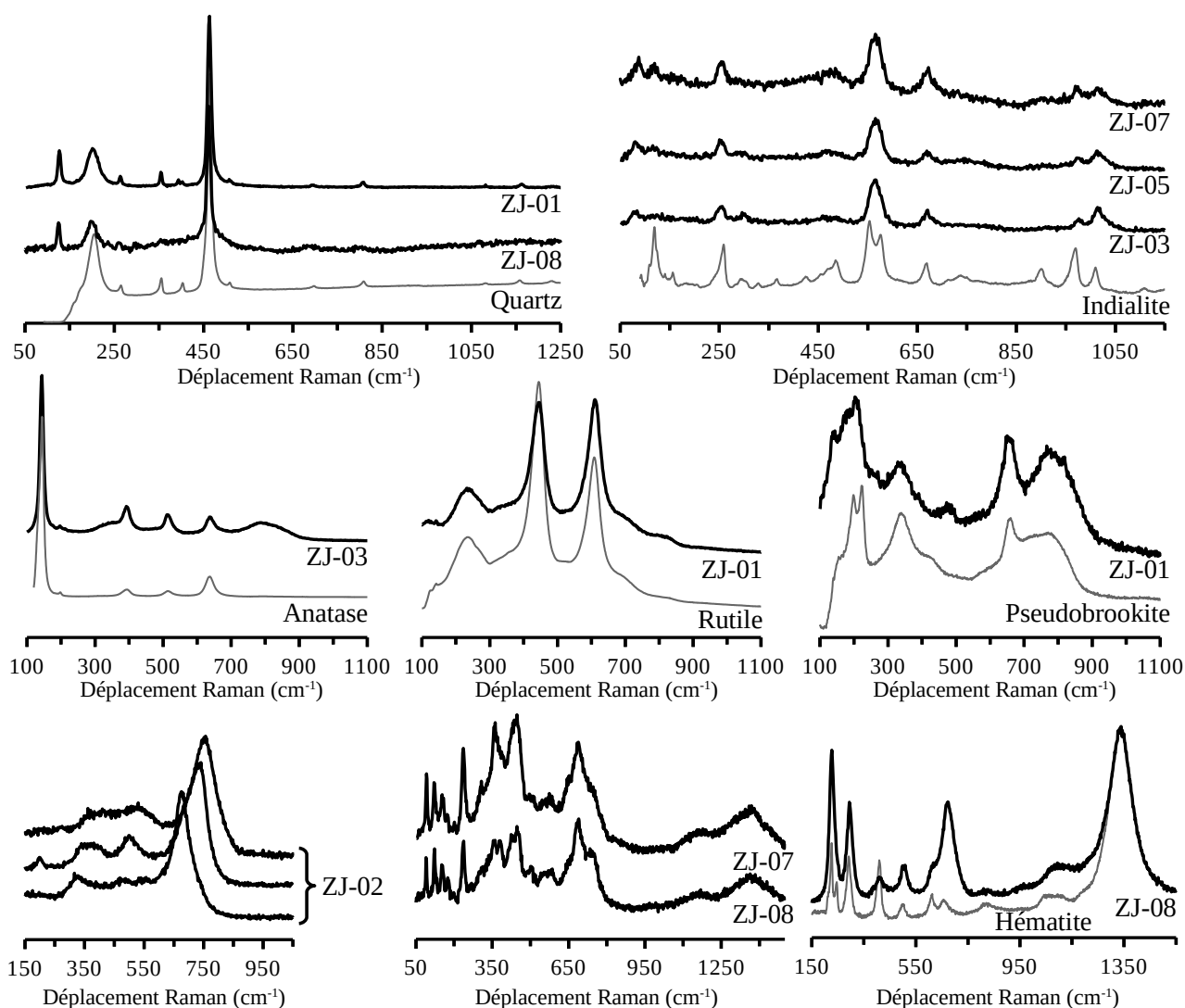


Figure 53 : Spectres Raman de quartz, d'indialite, d'anatase, de rutile, de pseudobrookite, de spinelle, de phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ et d'hématite acquis sur différents échantillons de la série ZJ (noirs) comparés avec des références de la base de donnée RRuff (gris)

Sur ZJ-07, les cristaux irisés ont tous été identifiés comme de la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, quelle que soit leur morphologie. Les spectres enregistrés sur les taches circulaires micrométriques présentent également les caractéristiques de cette phase. De plus, les spinelles proches des cristaux d'indialite n'ont pas été observés sur cet échantillon. Pour ZJ-08, un mélange de phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ et d'hématite a été observé, comme le suggérait l'épaule constaté sur le diffractogramme de cet échantillon.

Les spectres Raman enregistrés sur les zones amorphes en surface de tous les échantillons sauf ZJ-08 présentent des caractéristiques assez spécifiques, en particulier un pic assez bien défini entre 680 et 700 cm^{-1} (cf. Figure 54).

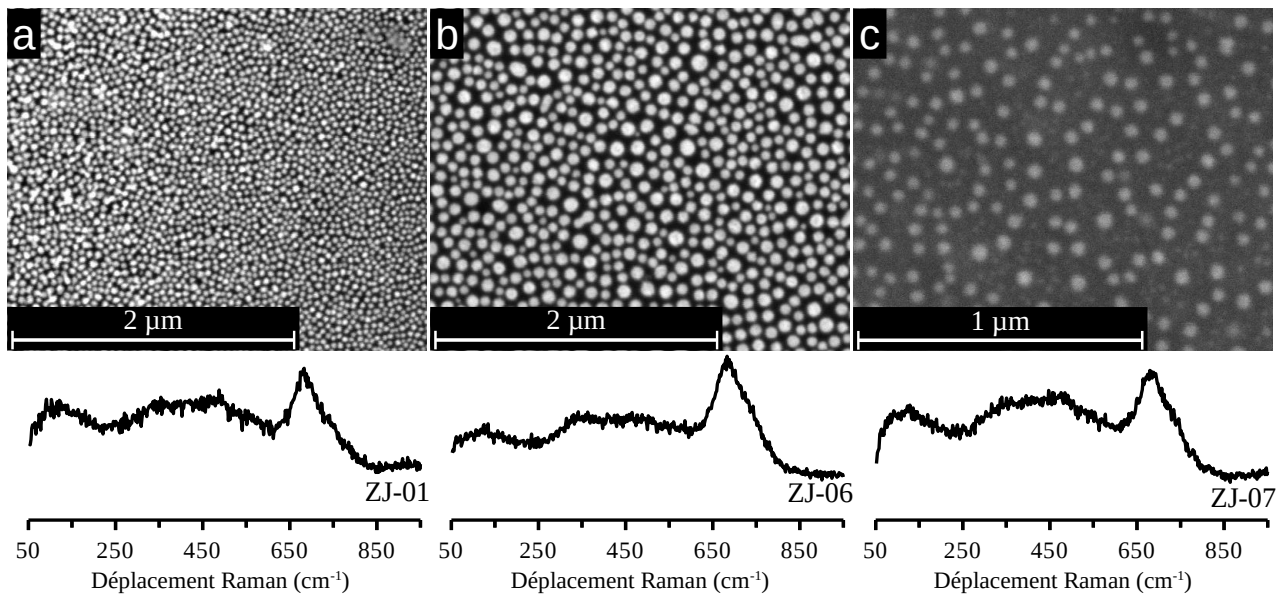


Figure 54 : Images SEM (BSE, 5 kV, grossissements $\times 25000$ et $\times 50000$) des zones vitrifiées de ZJ-01 (a) et ZJ-06 (b) et ZJ-07 (c) et spectres Raman associés

L'imagerie SEM effectuée sur ZJ-01, ZJ-06 et ZJ-07 a révélé la présence de particules de diamètres de l'ordre de 30 à 40 nm sur ZJ-01, 50 et 100 nm sur ZJ-06 et 50 et 20 nm sur ZJ-07. De plus, les analyses EDS ont montré qu'elles sont enrichies en fer. Ces particules sont présentes proche de la surface des échantillons et sont très densément réparties sur ZJ-01 à ZJ-06. Elles sont également présentes dans quelques zones de l'échantillon ZJ-07 où elles sont cependant beaucoup moins denses.

Le signal Raman enregistré associé à ces particules correspond à celui de spinelles riches en fer de type magnétite, maghémite ou hercynite, mal cristallisés au vu de la largeur du pic principal sur les spectres Raman et de l'absence de signal en diffraction. Ces particules sont riches en fer divalent, comme la glaçure qui contient vraisemblablement une forte teneur en ions ferreux dissous vu les conditions de cuisson. La présence de tels ions est d'ailleurs en bon accord avec la présence d'indialite contenant du fer, qui s'opère dans des milieux assez riches en fer divalent [210].

L'évolution de la taille et de la densité des particules entre ZJ-01 et ZJ-06 suggère qu'elles croissent au cours de la chauffe, puis qu'elles se redissolvent entre ZJ-06 et ZJ-07, ce qui expliquerait l'absence d'un tel signal sur ZJ08, en supposant qu'elles continuent de se dissoudre au cours du refroidissement.

3) Étude détaillée de ZJ-07

ZJ-07 étant le premier échantillon de la série ZJ à présenter de la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, son analyse a été particulièrement détaillée pour comprendre la cristallisation de cette phase. Tout d'abord, les observations de sa surface par SEM ont confirmé la présence des trois structures de morphologies différentes observées en microscopie optique : de grandes structures dendritiques, des cristaux

géométriques et des zones parsemées de formations circulaires micrométriques (qualifiées précédemment de « cercles micrométriques ») (cf. Figure 55).

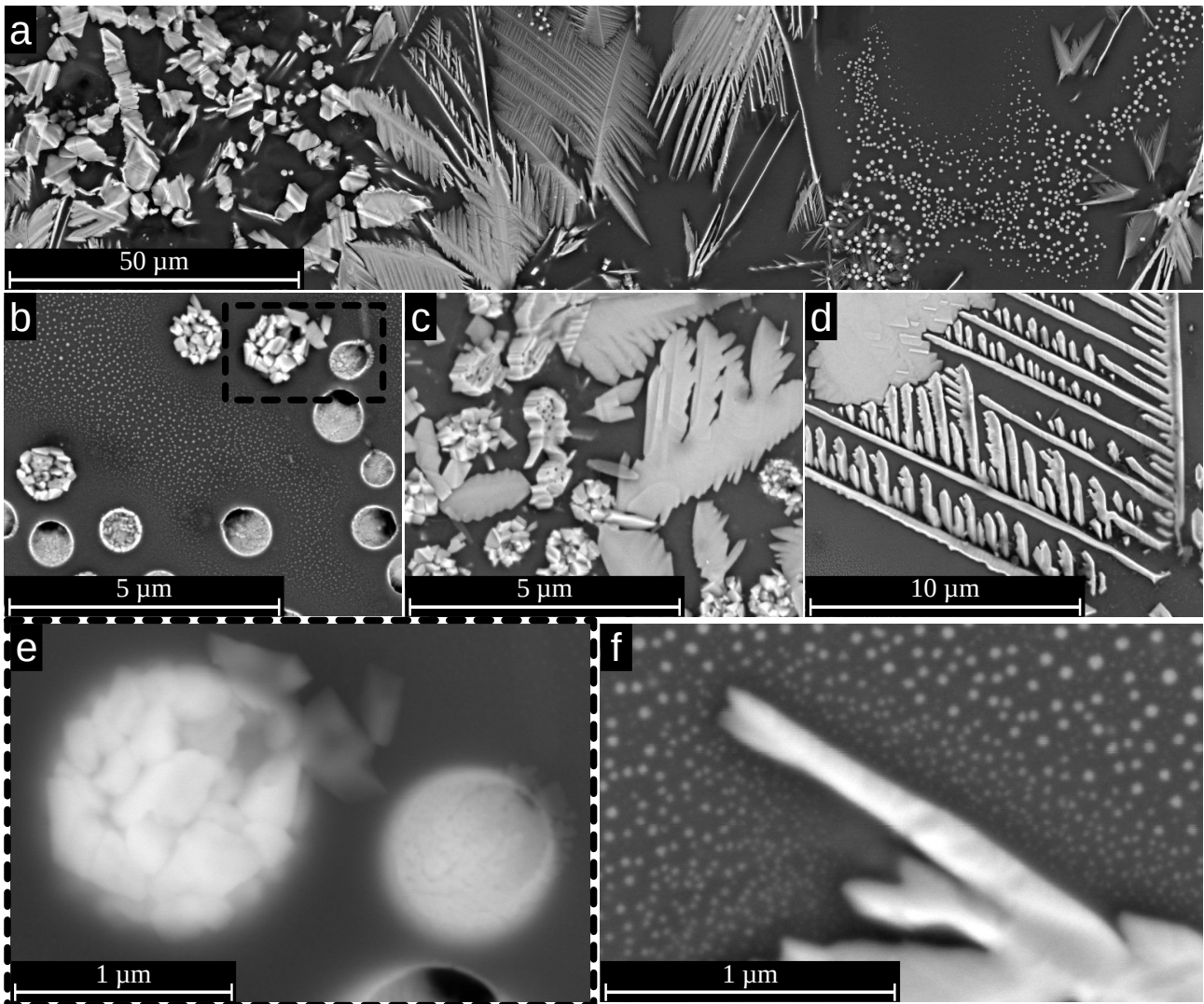


Figure 55 : Images SEM (BSE, 18 kV, grossissement x1000) de la surface de ZJ-07 (a), détails des différentes zones à 5 kV aux grossissements x10000 (b et c), x5000 (d) et à 18 kV au grossissement x50000 (e) et à 18 kV au grossissement x50000 (f)

Un examen à tension plus faible et à plus fort grossissement de ces dernières a révélé que ces formations circulaires sont en réalité des agrégats de germes ou de cristaux sub-microniques disposés comme autour d'une bulle (cf. Figure 55-b). Ces observations expérimentales semblent ainsi confirmer l'hypothèse de cristallisation de la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ autour de bulles proposée dans la littérature [165]. Selon les bulles, des cristaux sont plus ou moins développés, de germes à peine différenciables entre-eux jusqu'à des cristaux de plusieurs centaines de nanomètres (cf. Figure 55-e), suggérant que ces agrégats agissent comme des centres de germination.

La présence de structures intermédiaires entre ces agrégats et les dendrites de plusieurs dizaines de microns (cf. Figure 55-c) laisse supposer que certains des petits cristaux germinant autour des bulles croissent pour former les grandes dendrites (cf. Figure 55-d). Les autres sont sans doute déstabilisés par la croissance de leurs voisins et se dissolvent dans la glaçure pour compenser le pompage local du fer. Ce pompage semble également déstabiliser les nanoparticules de spinelle,

puisque leur taille diminue sensiblement à proximité des dendrites (cf. Figure 55-f). Leur densité semble augmenter également à cet endroit, ce qui suggère que la glaçure est encore suffisamment riche en fer pour en faire re-germiner.

Ensuite, l'imagerie des sections transverses a confirmé que la cristallisation constitue un phénomène de surface, les dendrites ne pénétrant que rarement à plus de 10 μm de profondeur dans la glaçure (cf. Figure 56-a et b).

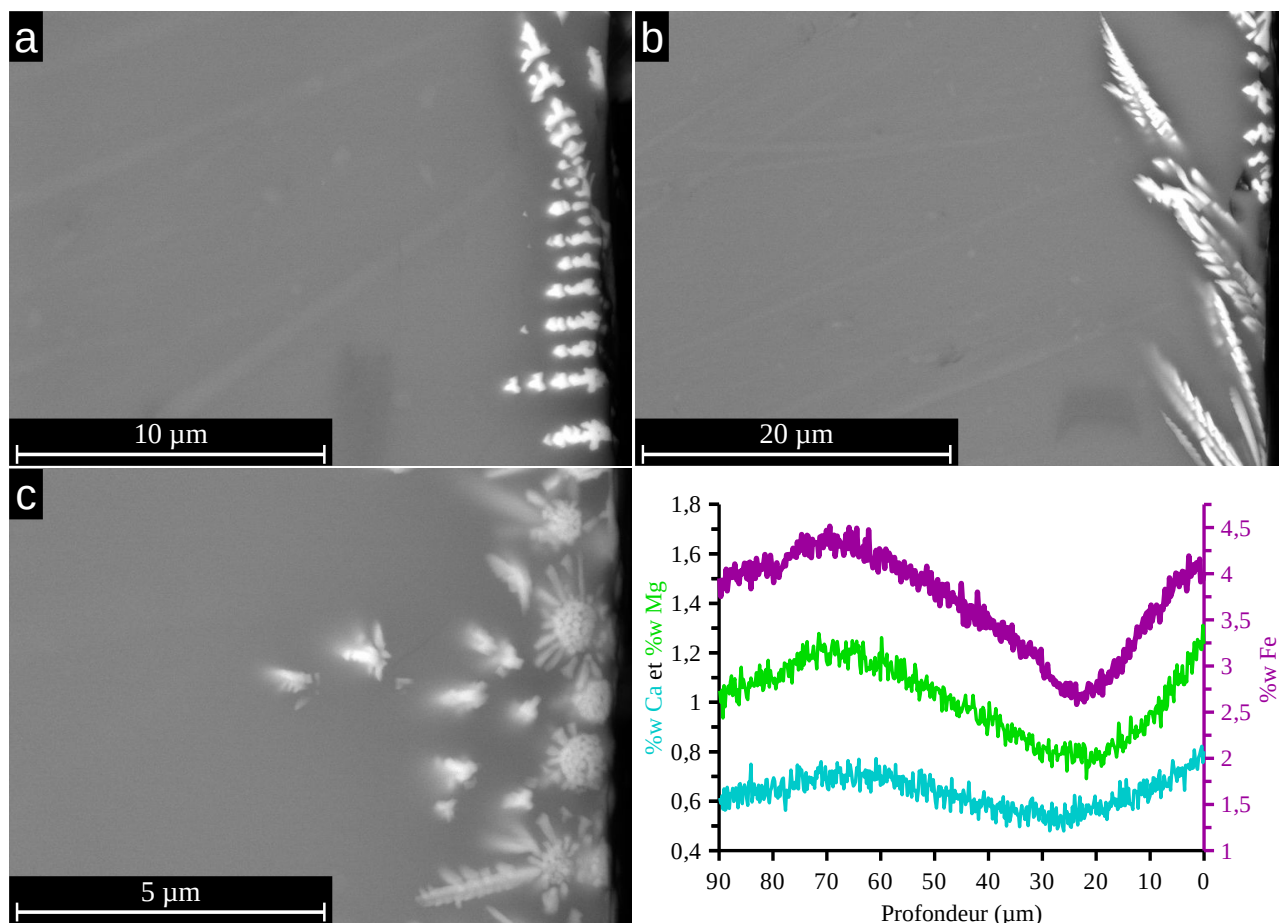


Figure 56 : Images SEM (BSE, 18 kV) de la section de ZJ-07 aux grossissements $\times 5000$ (a), $\times 10000$ (b) et $\times 2500$ (c) et profil EDS des %w élémentaires de Ca (cyan), Mg (vert) et Fe (violet) en profondeur

De même, les agrégats et les structures intermédiaires sont situés exclusivement à la surface (cf. Figure 56-c). Cette disposition des cristaux suggère que l'atmosphère de la chambre du four joue un rôle important dans la cristallisation. Contrairement aux échantillons archéologiques qui présentaient des stratigraphies complexes avec plusieurs couches de cristaux de tailles différentes, ZJ-07 ne présente qu'une seule couche. Cette différence peut indiquer, soit que les autres couches se forment plus tard dans le refroidissement, soit que le cycle thermique utilisé pour cuire les objets archéologiques était suffisamment différent pour les former. Un balayage EDS en profondeur a été effectué en veillant bien à éviter les différents cristaux visibles dans la glaçure (indialite et phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$) pour éviter de fausser les évolutions. Ce scan présente une nette diminution des taux de fer, magnésium et calcium d'environ 70 à 25 μm de profondeur, puis une augmentation de ces derniers

en se rapprochant de la surface. L'augmentation à proximité de la surface des taux de calcium et de fer notamment avait été également observée sur les échantillons archéologiques.

Pour caractériser plus finement encore les structures cristallines, trois lames fines ont été préparées respectivement sur un agrégat de germes, une structure intermédiaire entre les agrégats de germes et les longues dendrites, et perpendiculairement à de longues dendrites. Elles ont été étudiées par STEM-EDS (cf. Figure 57).

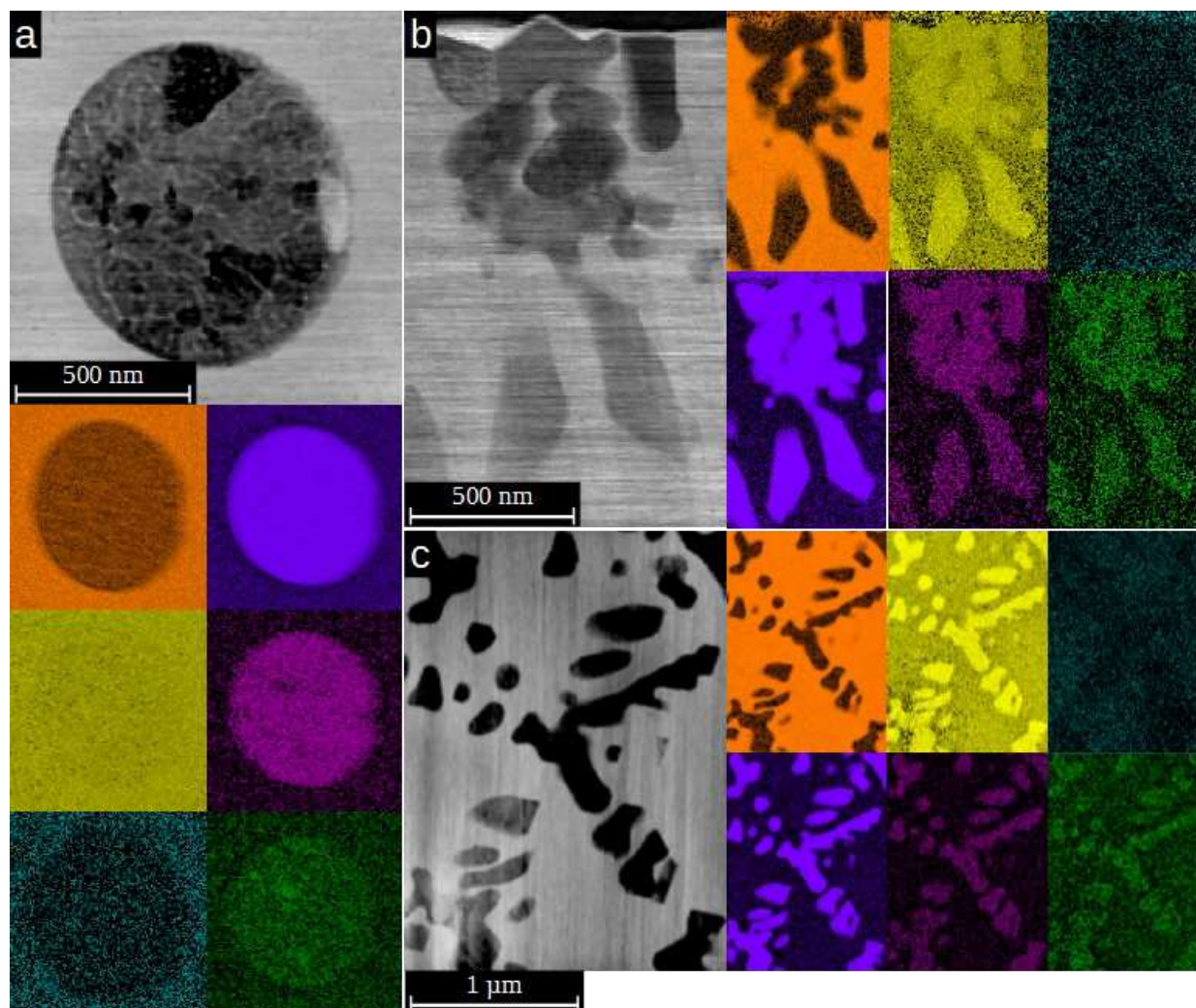


Figure 57 : Images STEM (200 kV, grossissement $\times 100000$) d'un agrégat de germes (a), d'une structure intermédiaire (b) et de dendrites (c) et cartes EDS élémentaires associées (Si (orange), Al (jaune), Ca (cyan), Fe (violet), Ti (rose) et Mg (vert))

Comme dans les échantillons archéologiques, ces analyses ont mis en évidence la présence de substitutions du fer par l'aluminium, le magnésium et le titane dans toutes ces structures. Comme dans le chapitre précédent, les ratios moyens (et écarts-types entre parenthèses) entre les concentrations atomiques des différents cations avec les taux d'oxygène mesurés multipliés par 100 par souci de lisibilité sont présentés dans le Tableau 10 ci-dessous. Les ratios Fe/Al ont également été calculés.

Ratios	Germes	Intermédiaire	Dendrite	Glaçure
Na/O	0,4 (0,2)	0,0 (0,1)	0,1 (0,1)	0,7 (0,1)
Mg/O	2,0 (0,2)	1,9 (0,2)	1,8 (0,2)	1,3 (0,1)
K/O	0,5 (0,1)	0,2 (0,1)	0,2 (0,1)	2,0 (0,2)
Ca/O	0,11 (0,02)	0,03 (0,04)	0,06 (0,04)	0,6 (0,1)
Ti/O	2,74 (0,04)	1,6 (0,2)	1,7 (0,1)	0,19 (0,04)
Al/O	7,7 (0,2)	15,7 (2,5)	19,6 (1,7)	9,0 (0,6)
Si/O	8,6 (0,2)	2,7 (0,6)	2,2 (0,4)	40,0 (0,7)
Fe/O	42,1 (0,2)	43,5 (3,1)	40,5 (1,7)	1,9 (0,2)
Fe/Al	5,5 (0,2)	2,8 (0,6)	2,1 (0,3)	0,21 (0,07)

Tableau 10 : Ratios élémentaires (% , sauf pour Fe/Al) mesurés sur les différents cristaux et la glaçure des lames minces de ZJ-07 par STEM-EDS

La composition de ces dendrites est délicate à comparer avec celle des échantillons anciens à partir des ratios par rapport à l'oxygène, puisque ces lames étaient montées sur une grille différente, demandant ainsi d'effectuer un nouveau vide, dont la qualité peut fortement influencer le taux d'oxygène mesuré. Cependant, le ratio Fe/Al, qui n'est pas influencé par le vide, peut servir de point de comparaison. Il a été calculé à 2,1 et 2,7 en moyenne respectivement sur les grandes et petites dendrites des échantillons anciens. Ces valeurs sont très similaires aux taux calculés sur les dendrites et les structures intermédiaires de ZJ-07 respectivement.

Il est intéressant de noter en outre, que comme pour les dendrites de BG-01, ce ratio est inférieur dans les cristaux les plus grands. Cette tendance est exacerbée dans les germes, qui contiennent très peu d'aluminium en comparaison, le ratio calculé étant de 5,5. Cette tendance suggère donc que l'incorporation de l'aluminium dans la structure stabilise fortement la phase ϵ -Fe₂O₃, permettant ainsi aux dendrites d'atteindre les tailles impressionnantes de plusieurs dizaines de microns.

Il est également remarquable que le ratio Fe/Al dans la glaçure varie légèrement entre les lames, valant en moyenne 0,27 (avec un écart-type de 0,01) sur la lame avec les agrégats de germes, 0,24 (avec un écart-type de 0,04) sur la lame avec les structures intermédiaires et 0,119 (avec un écart-type de 0,003) sur la lame avec les dendrites développées. Cette légère différence montre bien que la cristallisation pompe progressivement le fer dans la glaçure.

L'identification des phases et de l'orientation de ces dendrites a été déterminée par STEM-ACOM (malheureusement, des cartographies TKD n'ont pas pu être enregistrées sur ces lames) (cf. Figure 58).

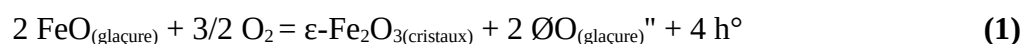
4) Mise en équation du mécanisme de croissance

Au vu des nombreuses similarités entre les échantillons du corpus archéologique et ZJ-07, en particulier la cristallisation en surface et la diffusion de fer et d'ions divalents vers cette dernière, cet échantillon semble constituer une bonne approximation pour comprendre le mécanisme de croissance des dendrites de phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ à relativement haute température.

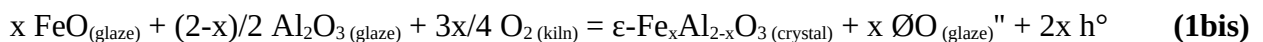
La cristallisation d'oxydes de fer en surface d'une matrice vitreuse riche en fer a été documentée dans la littérature à partir de recuits de verres sous atmosphère à la fois oxydante [211] et réductrice [212]. Dans le cas d'un recuit sous atmosphère oxydante (ce qui est le plus proche du cas de la série ZJ, le refroidissement ayant lieu sous une atmosphère faiblement oxydante), une diffusion du fer de la profondeur de la glaçure vers la surface a été identifiée pour alimenter la cristallisation de spinelles riches en fer [213], diffusion observée sur les échantillons anciens ainsi que sur ZJ-07. Ce phénomène est également associé à la diffusion d'ions divalents [211,214] ou monovalent [215] vers la surface du verre, évoquant à nouveau les observations effectuées sur le corpus archéologique avec le calcium. Le phénomène inverse a également été documenté sous atmosphère franchement réductrice [212].

Même si, dans ces études, les oxydes riches en fer ayant cristallisé en surface ne sont pas de la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, les similarités observées entre les échantillons étudiés ne peuvent pas être ignorées et suggèrent qu'un phénomène équivalent pourrait avoir lieu. La différence de structure des oxydes de fer cristallisant en surface des glaçures brunes pourrait être expliquée par une combinaison de la température plus haute, l'atmosphère faiblement oxydante et une composition initiale différente. Ainsi, afin de formaliser ce mécanisme, un jeu d'équation adaptée de ces études sur les recuits peut être établi [214].

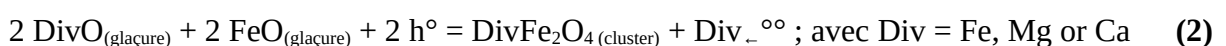
Tout d'abord, la faible quantité d'oxygène présente dans la chambre du four ou dans les bulles permet aux ions ferreux dissouts dans la glaçure de former les germes de phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ou de les faire croître en cristaux comme il a été observé sur ZJ-07. Cette formation crée localement un manque d'ions divalents dans la matrice vitreuse, illustré par la notation « $\emptyset\text{O}_{(\text{glaçure})}$ » :



Cette équation peut être adaptée pour prendre en compte l'intégration d'aluminium dans la structure lors de la croissance des dendrites (ou bien d'ions ferriques trivalents dissouts) :



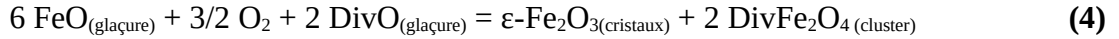
En plus du manque d'ions divalents dans la matrice vitreuse, cette réaction va aussi former des trous. Ces deux produits déstabilisant la matrice vitreuse, celle-ci va chercher à les compenser de deux manières. Tout d'abord en surface, la dissolution des particules de spinelle riches en fer peut permettre de combler partiellement ces manques, tout en relarguant des ions ferriques trivalents (ou aluminium qui vont les substituer) qui peuvent directement servir à la croissance de la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Ensuite, les trous créés par la germination (1) vont diffuser plus en profondeur, où ils vont localement modifier la structure de la matrice en formant une unité structurale (cluster) proche de la structure spinelle [214] tout en libérant des ions divalents (notés Div_\cdot) :



Les ions divalents libérés par cette réaction peuvent diffuser vers la surface pour combler les manques de divalent et stabiliser ainsi la glaçure en surface :



En associant les équations (1), (2) et (3) selon $(1) + 2*(2) + 2*(3)$, le bilan complet fait apparaître comme réactifs uniquement les ions ferreux et divalents de la glaçure ainsi que l'oxygène présent dans le four et en produits les cristaux de phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ et les modifications structurales internes de la glaçure :



Cette combinaison est également valable avec (1bis) en faisant une opération similaire en remplaçant le facteur 2 par x. La diffusion des trous et des ions divalents permet donc en quelque sorte de catalyser ce phénomène. Cette dernière étant proportionnelle à la température et inversement proportionnelle à la viscosité de la matrice vitreuse [216], son effet diminue petit à petit au cours du refroidissement. Ce phénomène est résumé sur la Figure 59, qui prend en compte les différentes espèces mises en jeu :

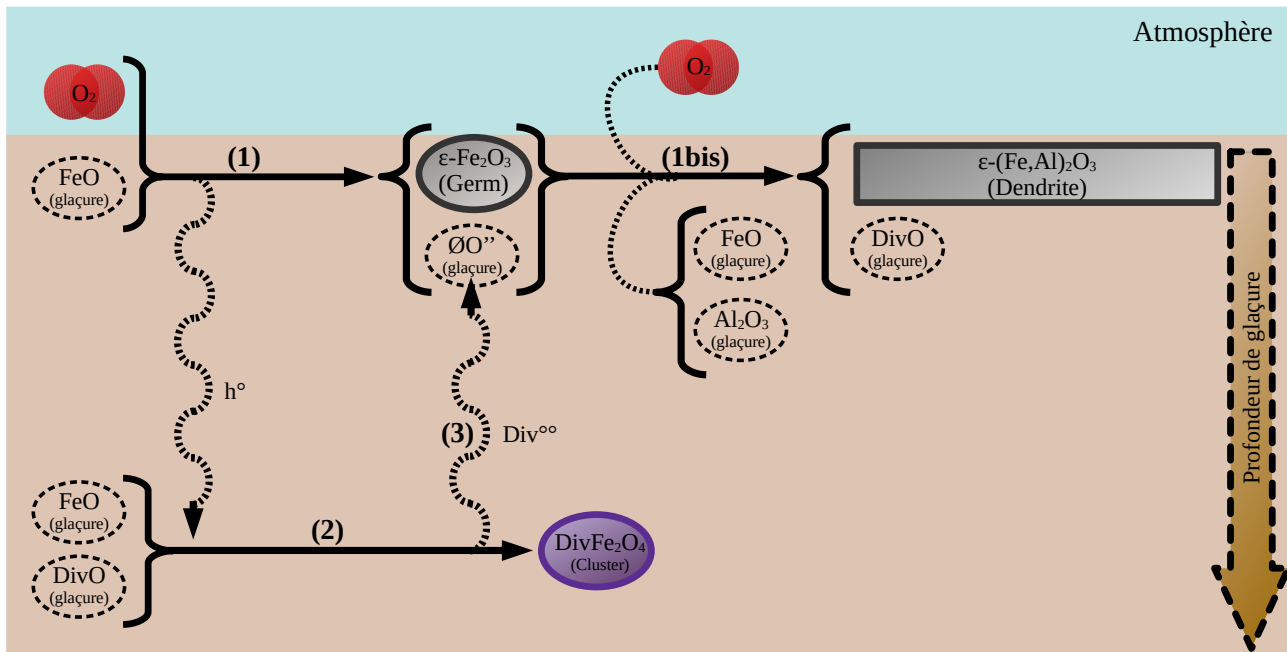


Figure 59 : Schéma du mécanisme de croissance catalysée par la diffusion des ions divalents

5) Étude détaillée de ZJ-08

La température diminuant progressivement au cours du refroidissement, la croissance des cristaux de phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ peut continuer entre la température à laquelle ZJ-07 a été sorti du four (1160°C) et le retour à température ambiante quand ZJ-08 a été récupéré. Ce dernier présente en outre de nouvelles phases en plus de la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, comme de l'hématite. Il semble ainsi que de nouveaux processus chimiques se mettent en place à plus basse température pour expliquer ces différences.

Les observations effectuées par SEM présentent quelques similarités avec les images acquises à la surface de ZJ-07, en particulier de grandes structures dendritiques et des structures plus géométriques (cf. Figure 60-a).

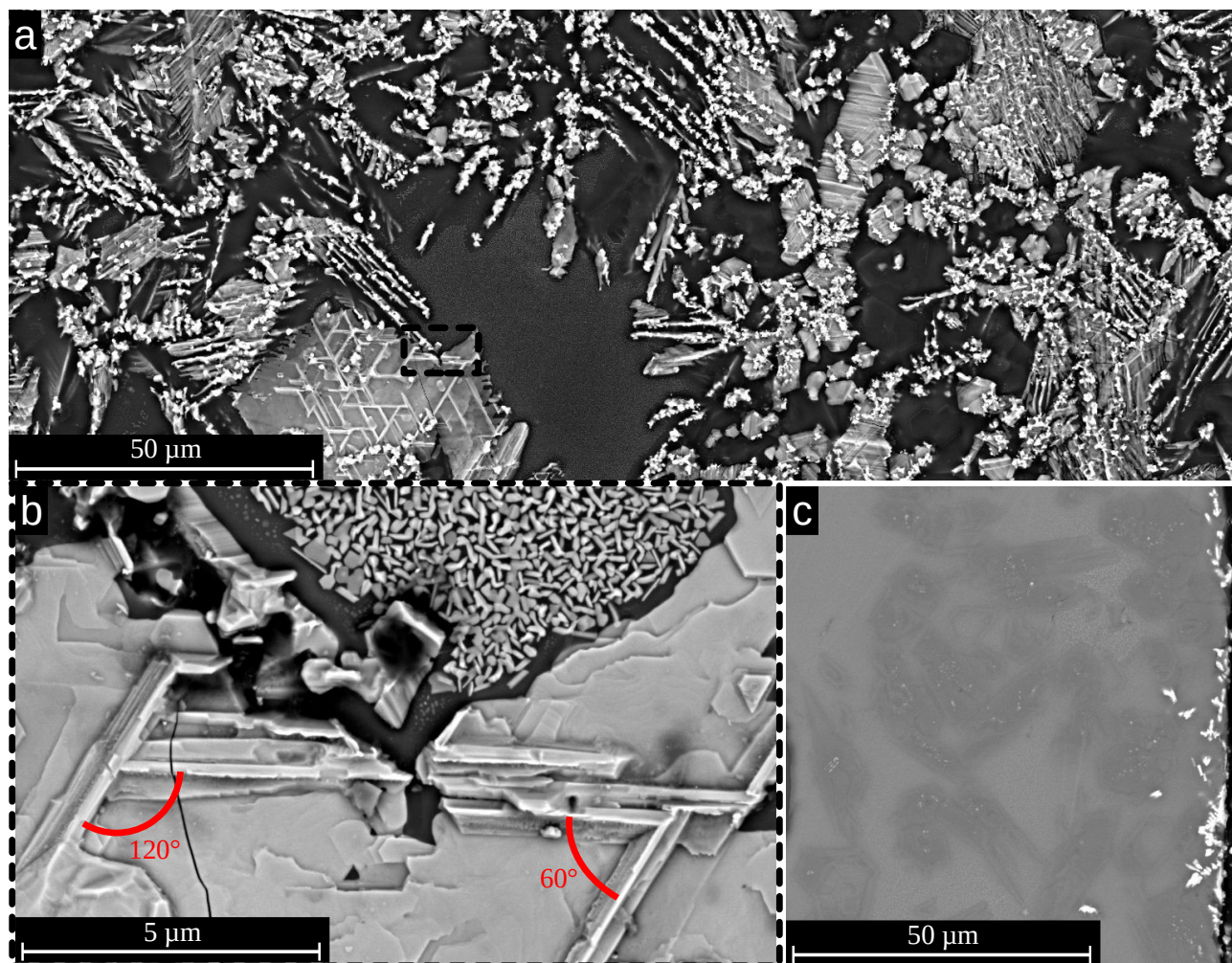


Figure 60 : Images SEM (BSE, 18 kV, grossissement $\times 1000$) de la surface (a) et de la section (c) de ZJ-08, détail de la surface (5 kV, grossissement $\times 10000$) (b)

De plus, de nouvelles structures ressemblant à de larges plaquettes de plusieurs dizaines de microns de large ont été observées. Elles présentent à leur surface des cristaux qui ressortent un peu et se croisent en formant des angles de l'ordre de 60° ou 120° (cf. Figure 60-b). Des zones sans aucune grande structure cristalline ont également été observées. Celles-ci sont parsemées de petits cristaux de formes géométriques diverses. Comme pour ZJ-07, les observations en section ont révélé l'absence de stratigraphie complexe comme celles constatées sur les échantillons anciens (cf. Figure 60-c), suggérant ainsi qu'il s'agit probablement de conditions de cuisson un peu différentes qui permettent de les former.

Afin de cartographier plus finement les phases présentes dans les différentes structures cristallines identifiées, trois lames minces ont été préparées, une perpendiculaire aux dendrites secondaires, une au milieu de l'une des larges plaquettes sur lesquels poussent les cristaux orientés avec des angles de 60° ou 120° et une dernière le long d'une dendrite primaire. Les deux premières lames ont été analysées par STEM-EDS puis elles ont toutes été analysées par TKD et STEM-ACOM.

Les cartographies élémentaires enregistrées sur ces lames mettent en évidence plusieurs différences par rapport à celles enregistrées sur ZJ-07 et les échantillons anciens, à savoir la présence évidente de plusieurs phases cristallines de composition différente et d'une zone de glaçure enrichie en silicium et appauvrie en aluminium autour des cristaux (cf. Figure 61).

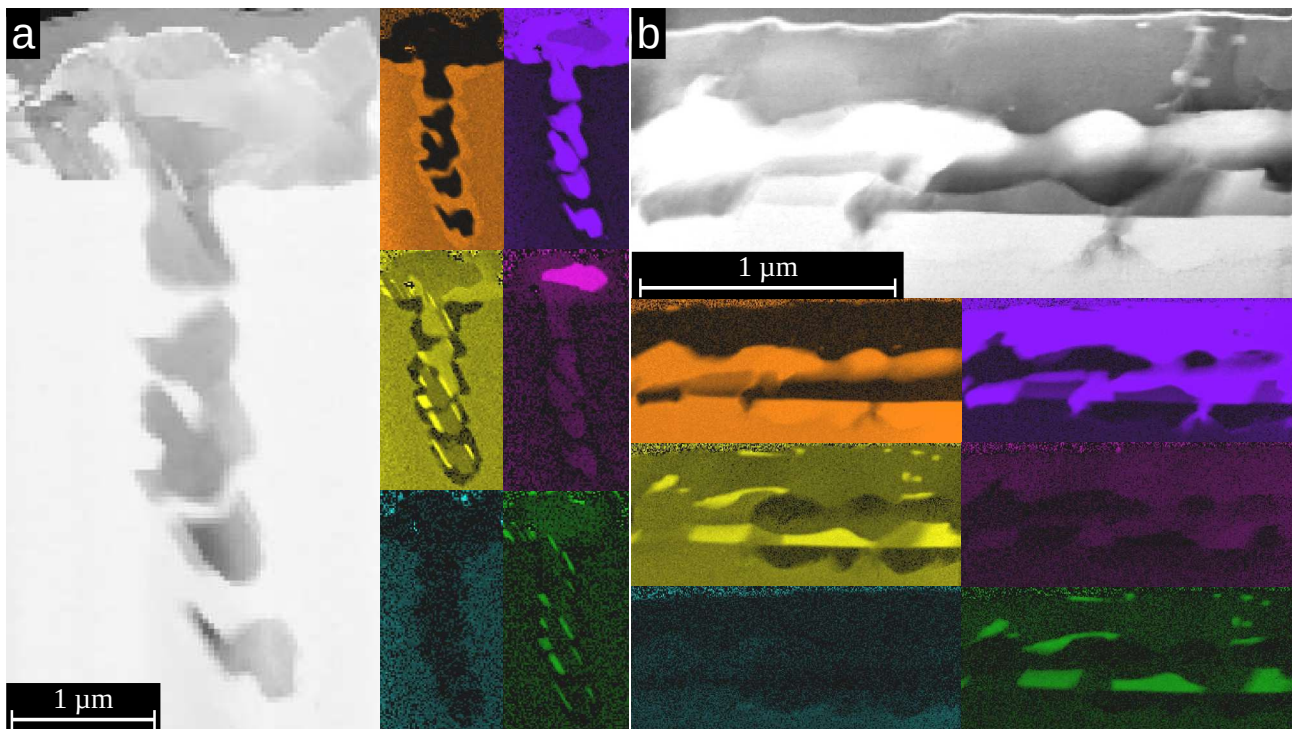


Figure 61 : Images STEM (200 kV, grossissement x30000) de la lame perpendiculaire aux dendrites secondaire (a) et de la lame de la plaquette (b) avec cartographies EDS élémentaires associées (Si (orange), Al (jaune), Ca (cyan), Fe (violet), Ti (rose) et Mg (vert))

La présence de nouvelles phases cristallines par rapport à ZJ-07 suggère qu'elles croissent probablement à des températures inférieures à la phase ϵ -Fe₂O₃. La lame perpendiculaire aux dendrites secondaires en présente quatre : deux riches en fer avec des taux de substitution par l'aluminium distincts comme l'atteste les différences de contraste sur la cartographie associée à cet élément (type 1 et 2), une riche en aluminium et en magnésium (type 3) et une particulièrement riche en titane (type 4). La seconde lame présente également deux phases riches en fer avec des taux de substitution par l'aluminium différents (type 1' et 2') et une riche en aluminium et en magnésium (type 3').

Pour la glaçure appauvrie en aluminium autour des cristaux, il s'agit sans doute du pompage par la cristallisation des espèces nécessaires dans la glaçure jusqu'à une température assez basse, à laquelle cette dernière est trop visqueuse pour ré-équilibrer sa composition. Ces marques sont également visibles sur les cartographies du fer, du magnésium et du titane, même si leur plus faible concentration dans la glaçure rend le contraste entre la zone appauvrie et l'autre moins flagrant que dans celle de l'aluminium.

Pour déterminer plus précisément la nature de ces phases, les ratios élémentaires moyens par rapport à l'oxygène (et écarts-types entre parenthèses) multipliés par 100 acquis sur les différents types de cristaux sont présentés dans le Tableau 11. En plus des éléments indiqués dans ce tableau, des traces de sodium, de manganèse, de chrome, de zinc et de nickel ont été détectées. Les deux

lames étant disposées sur des grilles différentes, leurs ratios élémentaires par rapport à l'oxygène ne sont malheureusement pas comparables, comme expliqué précédemment, néanmoins leurs ratios entre cations le sont.

Ratios	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4*	Type 1'	Type 2'	Type 3'
Mg/O	0,8 (0,5)	1,2 (0,4)	11,6 (4,4)	1,84	1,4 (0,3)	1,7 (0,1)	15,6 (2,8)
K/O	0,03 (0,02)	0,03 (0,02)	0,2 (0,1)	0,04	0,17 (0,08)	1,1 (0,9)	0,2 (0,1)
Ca/O	0,02 (0,02)	0,02 (0,03)	0,03 (0,05)	0,08	0,01 (0,01)	0,02 (0,02)	0,03 (0,03)
Ti/O	1,2 (0,4)	0,91 (0,09)	0,05 (0,05)	20,63	0,9 (0,1)	1,3 (0,6)	0,09 (0,06)
Al/O	7,0 (0,7)	15,5 (1,1)	36,9 (4,7)	7,69	5,8 (0,6)	14,0 (2,7)	42,0 (3,6)
Si/O	0,6 (0,3)	0,7 (0,1)	3,0 (2,0)	0,54	0,7 (0,1)	1,28 (0,06)	3,0 (3,6)
Fe/O	43,4 (2,1)	35,2 (1,4)	8,7 (1,3)	29,28	38,22 (0,1)	36,6 (5,9)	7,3 (2,8)
Fe/Al	6,2 (0,6)	2,3 (0,1)	0,24 (0,06)	3,81	6,7 (0,9)	2,63 (0,08)	0,17 (0,07)
Al/(Fe+Mg)	0,16 (0,02)	0,43 (0,02)	2,0 (0,9)	0,25	0,15 (0,02)	0,36 (0,01)	1,9 (0,2)
Lame	Lame perpendiculaire dendrites secondaires			Lame large plaquette			

*Tableau 11 : Ratios élémentaires (% , sauf pour Fe/Al) mesurés sur les différents cristaux des lames minces de ZJ-08 par STEM-EDS (*Aucun écart-type n'est donné pour le type 4 car il est seul, il n'y a donc qu'une seule zone de mesure)*

Ces compositions distinguent nettement les quatre types de cristaux au sein des lames. Dans chaque lame, les cristaux de type 1 (ou 1') contiennent plus de fer et significativement moins de magnésium et d'aluminium que les cristaux de type 2 (ou 2'). Les ratios Fe/Al sont du même ordre de grandeur entre 1 et 1' et entre 2 et 2', suggérant qu'il s'agit de cristaux de même nature entre les deux lames. De plus, les ratios calculés sur les cristaux de type 2 et 2' sont très proches de ceux de la phase ϵ -Fe₂O₃ mesurés sur ZJ-07. Il s'agit ainsi peut-être de cette même phase.

Les cristaux de type 3 et 3' ont des compositions complètement comparables, comme l'illustre leur ratio Al/(Fe+Mg). Ce plus, ce ratio étant très proche de 2, il suggère que cette espèce est probablement un spinelle avec une composition de type (Fe,Mg)Al₂O₄. Le ratio Mg/Fe de ces spinelles est très variable, allant de 0,9 à 3,6 selon les points de mesure. Des particules composites entre phase ϵ -Fe₂O₃ et spinelle substitué par le fer dans des proportions assez comparables ont été documentées sur des recreations de grès japonais de type Bizen [217]. Enfin le cristal de type 4 possède principalement du fer et du titane en ratio valant 1,42, suggérant qu'il s'agit sans doute d'un cristal de pseudobrookite. Il contient de l'aluminium et un peu de magnésium en substitution.

Afin de confirmer l'identification des cristaux de type 3 et 4 et de documenter celle des cristaux de type 1 et 2, des cartographies TKD et STEM-ACOM ont été effectuées sur ces deux lames, ainsi que sur celle découpée le long d'une dendrite primaire (cf. Figure 62).

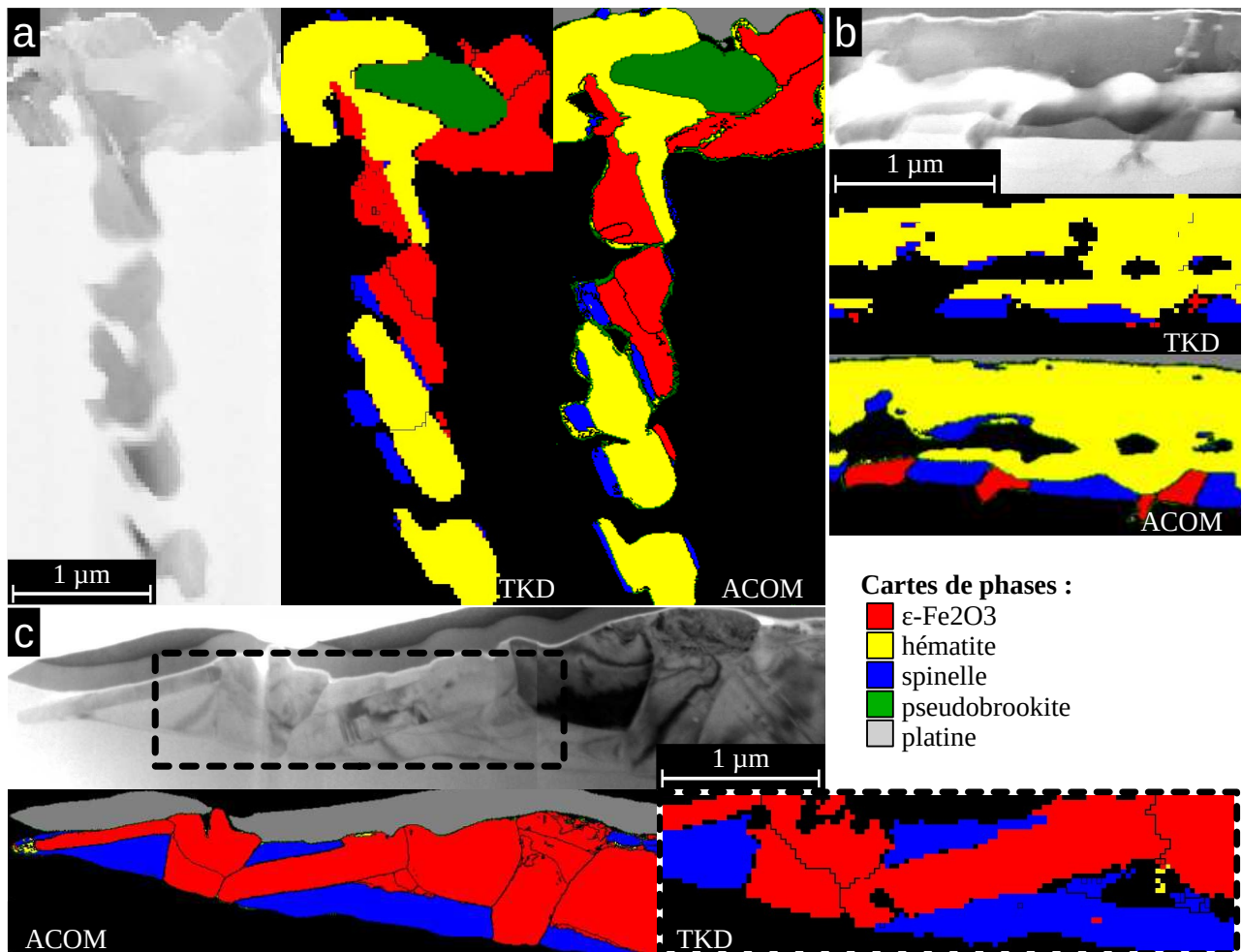


Figure 62 : Cartographies de phases TKD et ACOM sur la lame perpendiculaire aux dendrites secondaires (a), de la plaquette (b) et parallèle à une dendrite primaire (c) de ZJ-08

Tout d'abord, les cartographies de phases présentent, comme attendu d'après des analyses STEM-EDS, quatre phases distinctes. Il convient de constater que les identifications obtenues entre STEM-ACOM et TKD concordent bien. Les seules différences entre les résultats de ces deux techniques d'analyse se résument en quelques grains de phase ϵ -Fe₂O₃ qui n'ont pas été identifiés en TKD sur deux des lames (cf. Figure 62-b et c), probablement car ces grains étaient orientés de telle sorte que les lignes de Kikuchi n'étaient pas suffisamment bien définis.

Les grains précédemment associés aux phases de type 1 à 4 par STEM-EDS sont toujours associés à une même phase : l'hématite pour la 1, la phase ϵ -Fe₂O₃ pour la 2, le spinelle pour la 3 et la pseudobrookite pour la 4. La différence de composition observée entre l'hématite et la phase ϵ -Fe₂O₃, notamment sur les substitutions par l'aluminium, est cohérente puisque l'hématite tolère relativement peu d'aluminium dans sa structure. Le ratio Fe/(Fe+Al) calculé autour de 87 % (avec un écart-type de 0,02) pour les cristaux d'hématite des deux lames étudiées correspond à une composition stable à haute température, usuellement au-dessus de 1000°C [218]. Une composition de température si élevée est surprenante, puisqu'aucun cristal d'hématite n'a été observé à 1160°C sur ZJ-07. Les cristaux d'hématite sont positionnés à des endroits où des dendrites de phase ϵ -Fe₂O₃ pourraient être attendus dans la lame perpendiculaire aux dendrites secondaires, par comparaison avec la morphologie des lames de LHP-01 ou LHP-02 présentées au chapitre précédent. Puisqu'il est commun que la phase ϵ -Fe₂O₃ non substituée par de l'aluminium se transforme en hématite

[133], il est également possible qu'il s'agisse ici d'une transformation partielle de la phase substituée en hématite. Cette transformation pourrait ainsi expliquer le fait qu'elle garde une quantité assez importante d'aluminium dans sa structure. Elle n'explique cependant pas la composition des grandes plaquettes d'hématite qui ne sont pas présentes sous forme de phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ dans ZJ-07 et aucune étude n'a été menée pour savoir si cette transformation est possible avec de tels niveaux de substitution.

La présence d'une si grande quantité d'hématite ainsi que de ce type de spinelle est assez inhabituelle, puisque l'hématite est généralement assez rare dans les échantillons archéologiques et qu'aucun spinelle alumino-magnésien n'a été documenté. Leur présence en si grande quantité dans cet échantillon met donc en évidence une variation entre leurs conditions de fabrication et les productions des artisans Sòng. Une matière première ou vitesse de refroidissement différente pourrait peut-être expliquer la formation de ces phases.

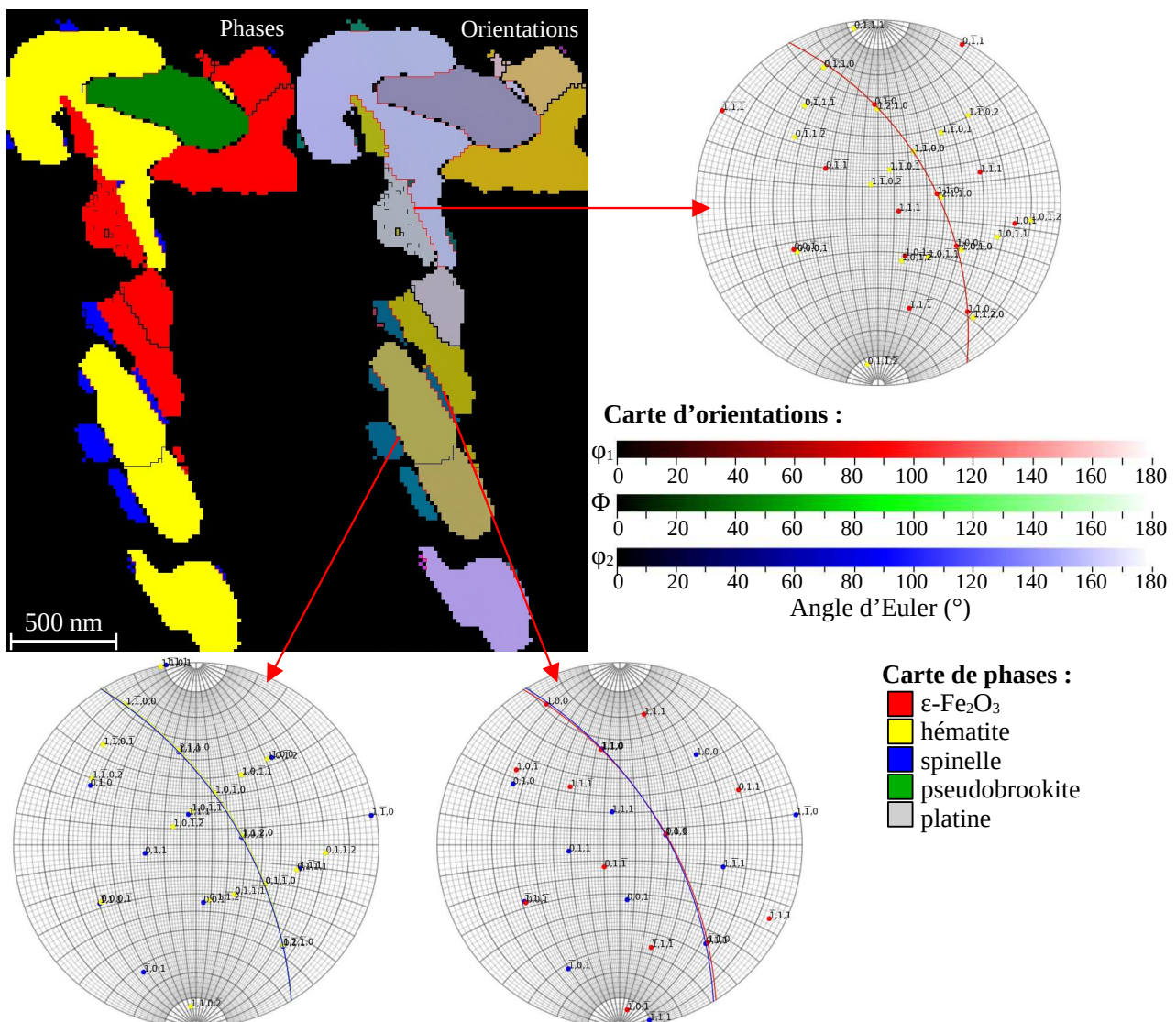


Figure 63 : Cartographie de phase et d'orientation de la lame perpendiculaire aux dendrites secondaire de ZJ-08 et figures de pôle associées à quelques interfaces

Contrairement aux orientations documentées sur ZJ-07 ou les échantillons archéologiques, cette cartographie révèle l'existence d'orientations distinctes des cristaux de phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, comme

l'illustrent les couleurs différentes (gris et brun-verdâtre) dans la cartographie d'orientation. Ces orientations ont des angles φ_1 et Φ de même ordre de grandeur, mais se distinguent par leur angle φ_2 différent de 120° . De même, deux orientations sont observées pour les cristaux d'hématite (lavande et brunâtre) avec des angles φ_1 et Φ similaires et un angle φ_2 différent de 60° . Ces différences, multiples de 60° , suggèrent la croissance de macles. Le spinelle ne présente quant à lui qu'une seule orientation (bleu canard foncé).

Afin de vérifier les relations entre les différentes phases, les orientations des paires de grains de phases différentes séparées par une interface plane ont été tracées dans des figures de pôles communes (cf. Figure 63). Sur ces dernières, des relations de phases évidentes sont apparues, mises en valeur par la superposition de certains axes particuliers. Elles ont permis également de mettre en valeur la superposition systématique de plans spécifiques : les plans des familles (0,0,1) pour la phase ε -Fe₂O₃, (0,0,0,1) pour l'hématite et (1,1,1) pour le spinelle. Les mêmes plans ont été identifiés dans les structures mixtes spinelle/ ε -Fe₂O₃ des grès de type Bizen [217]. La spécificité de ces plans suggère la possibilité éventuelle d'épitaxie. Ces mêmes relations de phases ont été retrouvées avec les données ACOM et les paires de grains de la lame parallèle à la dendrite primaire.

Pour investiguer les possibilités d'épitaxie, les structures de ces phases ont été représentées à l'aide des fichiers CIF (PDF-01-071-5088, ICSD51122 et COD-1540775) et orientées de telle sorte que les plans repérés grâce aux figures de pôles soient dans le plan de la page. Ces représentations montrent que ces structures contiennent toutes des plans denses d'atomes d'oxygène disposés de manière pseudo-hexagonale (cf. Figure 64).

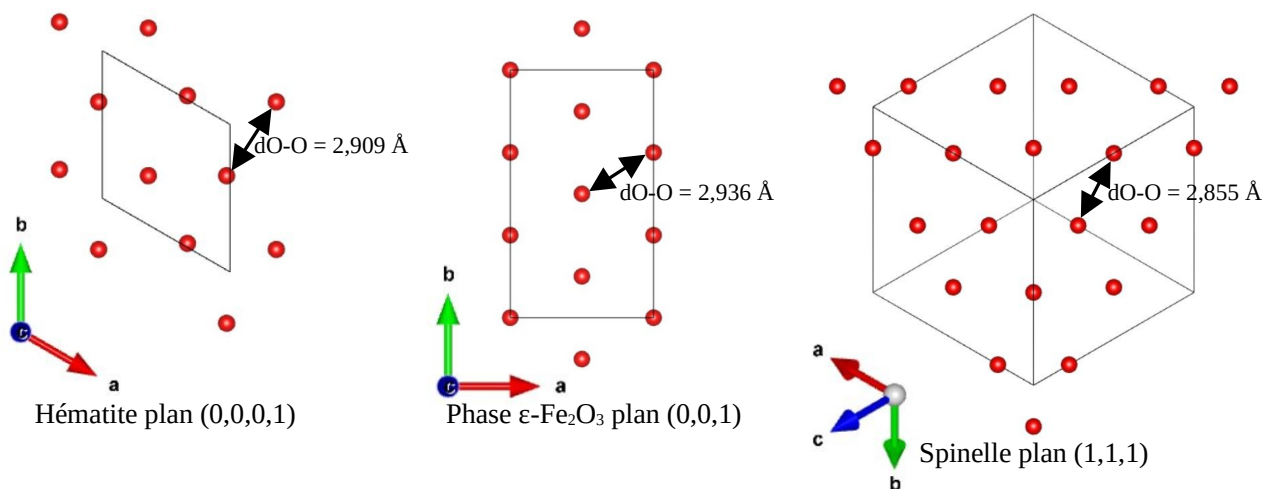


Figure 64 : Représentation des plans denses d'atome d'oxygène dans les plans (0,0,0,1) de l'hématite, (0,0,1) de la phase ε -Fe₂O₃ et (1,1,1) du spinelle

Pour vérifier la possibilité d'épitaxie entre ces différents plans, le désaccord de réseau (ou mismatch) peut être calculé [219]. Pour le déterminer, ces plans atomiques étant pseudo-hexagonaux, il est nécessaire de calculer tout d'abord la distance moyenne entre deux atomes d'oxygène à l'aide des paramètres de maille et de relations géométriques. Ces distances ont été évaluées ainsi :

$$dO-O_{\varepsilon-Fe_2O_3} = 2,936 \text{ \AA} ;$$

$$dO-O_{\text{hématite}} = 2,909 \text{ \AA} ;$$

$$dO-O_{\text{spinel}} = 2,855 \text{ \AA}$$

Ces distances peuvent ensuite être utilisées pour calculer le mismatch linéaire entre les différentes phases, défini comme la différence en valeur absolue des deux distances divisée par celle de la phase qui sert de substrat. Ces valeurs ont été déterminées ainsi :

$$\text{mis}(\text{hématite}/\varepsilon-Fe_2O_3) = 0,92 \% ;$$

$$\text{mis}(\text{spinel}/\varepsilon-Fe_2O_3) = 2,76 \% ;$$

$$\text{mis}(\text{spinel}/\text{hématite}) = 1,86 \%$$

Ces valeurs sont inférieures à 5 %, ce qui correspond à une situation propice à l'épithaxie [220,221]. De plus, les substitutions par l'aluminium dans la phase $\varepsilon-Fe_2O_3$ et l'hématite permettent de faire diminuer légèrement les paramètres de maille, ce qui diminue les distances moyennes entre atomes d'oxygène et donc le mismatch, rendant l'épithaxie encore plus favorable. Les conditions étant propices pour l'épithaxie, il est surprenant que les échantillons archéologiques ne présentent pas cette diversité de phases.

Pour prévenir la croissance de l'hématite et du spinelle, qui s'effectue à plus faible température que celle de la phase $\varepsilon-Fe_2O_3$, il est possible d'imaginer plusieurs solutions. Un travail sur la composition est imaginable d'une part, avec par exemple une glaçure moins chargée en magnésium ou en aluminium qui pourrait défavoriser la formation de spinelle. Un travail sur le refroidissement peut également être envisagé, avec d'un côté un refroidissement accéléré sous une certaine température, qui agirait comme un genre de « trempe » pour figer les dendrites de haute température. Cependant, cette solution ne semble pas envisageable en prenant en compte d'une part la fragilité des objets par rapport au choc thermique, d'autre part les dimensions imposantes des fours et la disposition des objets dans les cassettes qui feraient tampon et rendent peu plausible une diminution suffisamment rapide de la température. D'un autre côté, un refroidissement bien plus lent pourrait permettre de stabiliser fortement les dendrites de phase $\varepsilon-Fe_2O_3$ et consommer assez de fer dans la glaçure pour prévenir soit la formation de l'hématite, soit la transformation de la phase $\varepsilon-Fe_2O_3$ en hématite dans le cas où cette transformation est considérée possible.

6) Bilan

L'étude des éprouvettes constituant la série ZJ a permis tout d'abord de démontrer que la croissance de la phase $\varepsilon-Fe_2O_3$ dans les glaçures brunes a lieu au cours du refroidissement. Cette croissance s'effectue dès les hautes températures, puisque des dendrites déjà bien développées ont été observées sur l'échantillon sorti du four à 1160°C. Ce dernier présentait aussi des agrégats de germes circulaires, se développant comme autour de bulles. C'est à partir de ces agrégats que les dendrites croissent progressivement, aidées d'une part par la diffusion d'ions divalents vers la surface de glaçure et d'autre part par la dissolution de nanoparticules de spinelle riche en fer, formées au cours de la chauffe pour compenser le pompage des ions ferreux par la réaction de cristallisation. Il a été également noté que les dendrites se chargent en aluminium au cours de leur croissance, suggérant que cet élément permet de stabiliser cette phase.

Quelques différences notables ont cependant été notées avec l'échantillon récupéré en fin de cycle thermique, en particulier l'absence de stratigraphie complexe sous la surface et la présence en proportion significative d'hématite, usuellement rare dans les glaçures Sòng, et d'un spinelle principalement à base de magnésium et d'aluminium qui n'a été identifié sur aucun échantillon ancien. Ces deux phases présentent des plans communs avec la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ pour lesquels les possibilités d'épitaxie sont très favorables, avec des mismatches linéaires calculés inférieurs à 3 %. La présence de ces phases suggère que les protocoles de cuisson Sòng étaient suffisamment différents de celui-ci pour prévenir leur formation.

C – Suivi en température *in-operando*

Afin de comprendre plus en profondeur les réactions mises en jeu en cours de chauffe, des suivis *in-operando* par diffraction ont été menés à l'ESRF en capillaire en verre de quartz avec un standard de poudre de platine pour déterminer la température dans le milieu réactionnel. Malgré leur bonne résistance thermique théorique, la nature chimique de ces capillaires les rend réactifs vis-à-vis des matières premières étudiées à haute température. Il a été ainsi difficile d'étudier les refroidissements après une montée à haute température puisque les capillaires fondaient. Quelques refroidissements ont tout de même pu être étudiés (trois capillaires sur sept).

1) Détermination de la température du milieu réactionnel

Comme indiqué juste au-dessus, la détermination de la température exacte dans les capillaires a été effectuée avec un standard de poudre de platine. En effet, à cause de la dilatation thermique, les paramètres de maille du platine augmentent, entraînant un décalage des pics vers les angles inférieurs (cf. Figure 65).

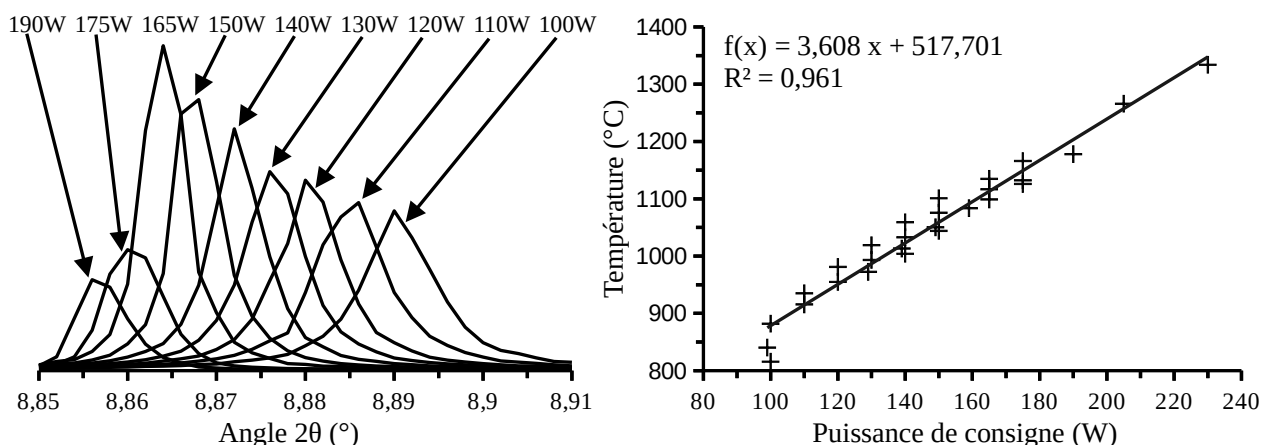


Figure 65 : Position de la raie [1,1,1] du platine selon la puissance de chauffe de consigne et corrélation entre la puissance de consigne et la température

Ce décalage peut-être relié à la température à l'aide d'un algorithme développé sur ID22 qui détermine précisément la position de la raie [1,1,1] du platine (qui se trouve autour de 8,9° avec le rayonnement utilisé). Les paramètres de maille sont ainsi obtenus puis la température est déterminée. Cette corrélation a permis de relier la puissance de consigne (paramètre contrôlé par

l'utilisateur) avec la température dans le capillaire avec un coefficient de corrélation correct de 0,961 en se basant sur trois capillaires (cf. Figure 65).

Cependant, pour les autres capillaires, cette corrélation a été impossible à effectuer car les pics du platine étaient dédoublés et fortement décalés vers les grands angles, donnant des valeurs de paramètres de maille absurdes (cf. Figure 66).

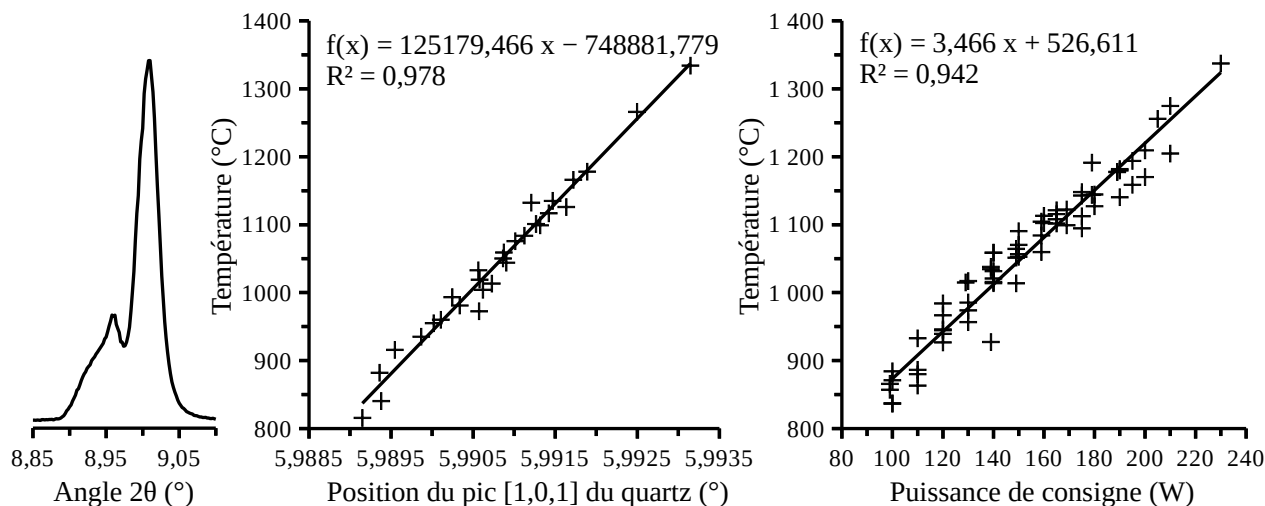


Figure 66 : Exemple de pic dédoublé (diffractogramme de ZJ-raw chauffé avec une puissance de consigne de 100 W) et corrélations entre la position du pic [1,0,1] et la puissance de consigne avec la température

Ces francs décalages ont été identifiés comme la formation parasite d'un alliage carburé de magnésium et platine (fiche PDF-65-7096), plausible vu la présence de calcite et dolomite dans les matières premières apportant le carbone et de plusieurs composés minéraux pouvant apporter le magnésium. Les pics de ce composé étant intenses et proches de ceux du platine, la détermination de la température par la méthode habituelle est impossible sur ces diffractogrammes. Ainsi, pour déterminer la température de ces échantillons, le pic [1,0,1] du quartz (situé autour de 5,99° avec le rayonnement utilisé) a servi d'étalon interne, puisque les matières premières en contiennent toutes en quantité assez importante. Une corrélation a ensuite été effectuée entre la position de ce pic et la température sur les échantillons avec laquelle la détermination par le platine était possible. Le coefficient de corrélation de 0,978 étant tout à fait acceptable, il a été utilisé pour déterminer la température des autres échantillons. Une fois les températures déterminées, ces dernières ont été reliées aux puissances de consignes pour vérifier la corrélation, qui s'est avérée correcte, avec un coefficient de 0,942, avec néanmoins une dispersité des points importante en température en fonction des échantillons, de l'ordre de $\pm 50^{\circ}\text{C}$, probablement due aux différentes compositions des matières premières.

2) Étude en température

Comme évoqué précédemment, les diagrammes obtenus sur les matières premières crues présentent des pics de quartz et de la calcite particulièrement intenses par rapport à ceux des autres espèces, ce qui suggère qu'une démixtion de la matière première a eu lieu lors de la mise en

capillaire. La matière première étudiée ici a donc une teneur en micas, feldspaths et autres minéraux plus faible, ce qui explique la faible intensité des pics présentés dans la suite.

Malgré les problèmes de mises en capillaire, ces analyses ont permis de mettre en lumière quelques phénomènes chimiques ayant lieu au cours de la cuisson. Tout d'abord, la fonte à relativement basse température de plusieurs espèces, comme la calcite, la dolomite la montmorillonite et l'albite (cf. Figure 67).

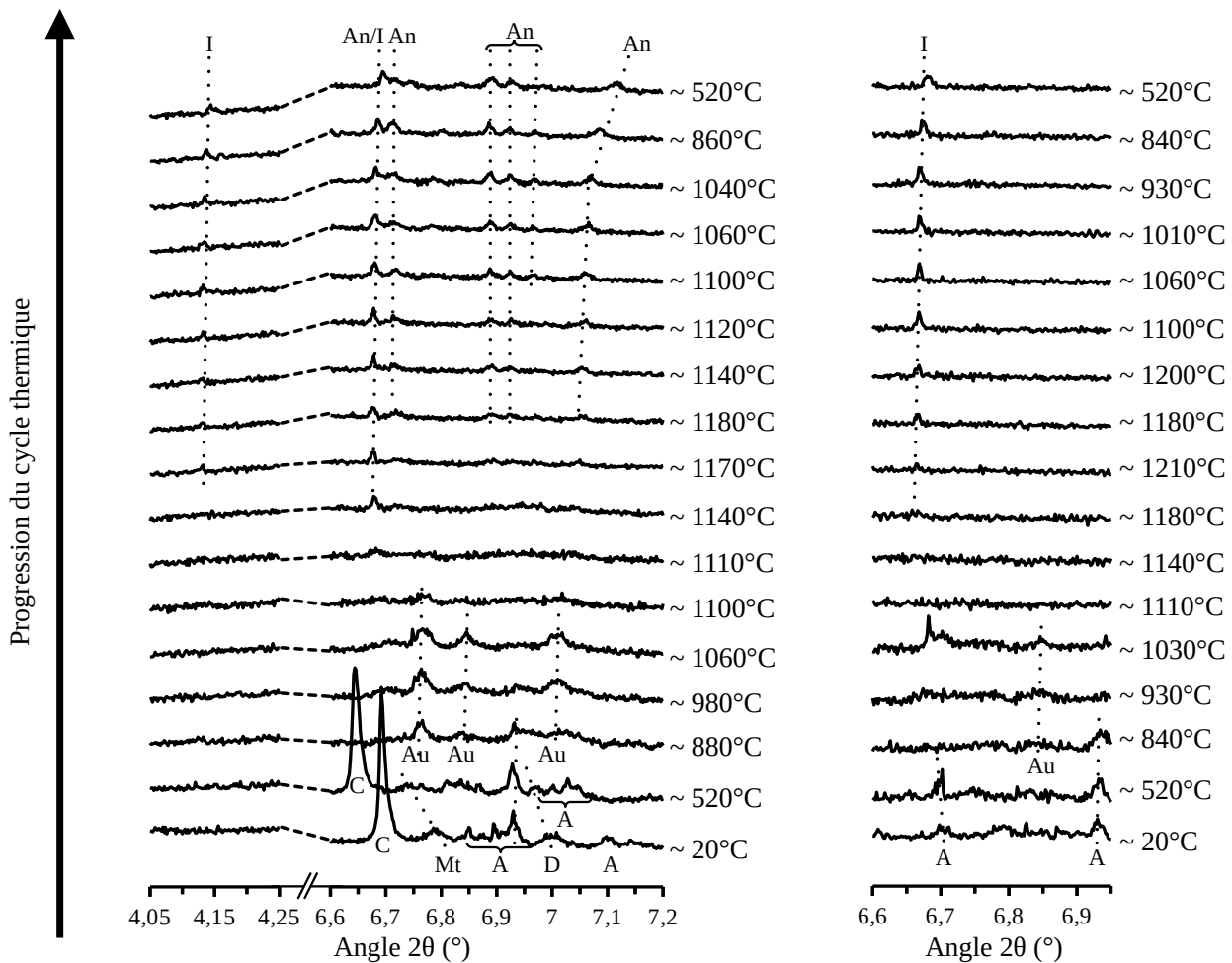


Figure 67 : Diffractogrammes au cours de la chauffe de ZJ-raw (gauche) et Jish 1 (droite) avec indexation des phases (A = albite, An = anorthite, Au = augite, C = calcite, D = dolomite, I = indialite, Mt = montmorillonite)

Les carbonates ainsi que la montmorillonite disparaissent systématiquement entre le diffractogramme enregistré à 45 W (soit autour de 520°C d'après les calculs avec le platine, en dehors du domaine linéaire des corrélations présentées au-dessus) et celui enregistré à 100 W (soit environ 880°C pour l'échantillon présenté). L'albite et la muscovite tiennent un peu plus longtemps, puisque les pics de ces espèces sont encore présents autour de 900°C pour la plupart des matières premières.

La formation transitoire de pyroxène comme de l'augite ((Ca,Mg,Al,Ti,Fe)₂(Si,Al)₂O₆) a été observée à la montée entre environ 880°C et 1110°C. Les pics associés à cette phase semblent plus intenses dans les capillaires possédant de la calcite, bien que la présence de très légères bosses dans ceux n'en possédant pas suggère qu'il s'en forme tout de même une faible quantité. Cette phase

disparaît au-dessus d'environ 1100°C, légèrement en dessous des températures de fusion habituelles observées pour ce genre de systèmes [222], probablement à cause de la faible quantité de matière dans les capillaires.

La cristallisation d'indialite été identifiée, à partir d'environ 1140°C à 1180°C selon les capillaires. Les pics associés à cette phase restent présents après leur cristallisation, ce qui est cohérent avec les observations effectuées sur la série ZJ. De l'anorthite cristallisant à environ 1180°C a également été identifiée dans la plupart des capillaires. Cette phase est cependant absente des capillaires contenant très peu de calcite.

La phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ n'a été identifiée dans aucun des capillaires ayant résisté à la montée en température puis au refroidissement. Son absence est sans doute due aux conditions expérimentales en capillaire assez différentes des conditions des fours traditionnels, notamment du point de vue de l'atmosphère qui joue vraisemblablement un rôle assez important dans sa formation. La démixtion au remplissage, qui a appauvri les matières premières en fer notamment, a probablement également joué un rôle non négligeable dans l'absence de sa formation.

D – Étude des créations noires à reflets bleus

Les céramiques à glaçures noires à reflets bleus, comme évoqué précédemment, constituent aujourd'hui l'excellence des glaçures noires et brunes. Les céramiques historiques sont considérées comme des trésors nationaux au Japon où elles sont conservées [90] et les créations sont fabriquées par de grands maîtres reconnus nationalement, voire internationalement. Cette section se consacre à l'étude des tessons SUN-1 et SUN-2, qui ont été fabriqués avec la matière première Fuj2 et leur comparaison avec G-lisse et G-plissé. Pour plus de détails sur ces échantillons, se référer au Chapitre II, B, 2) Échantillons issus de créations modernes page 64.

1) Observations optiques

Malgré leur ressemblance visuelle, une simple observation par microscopie optique révèle que les tessons SUN-1 et SUN-2 présentent des aspects franchement différents (cf. Figure 68).

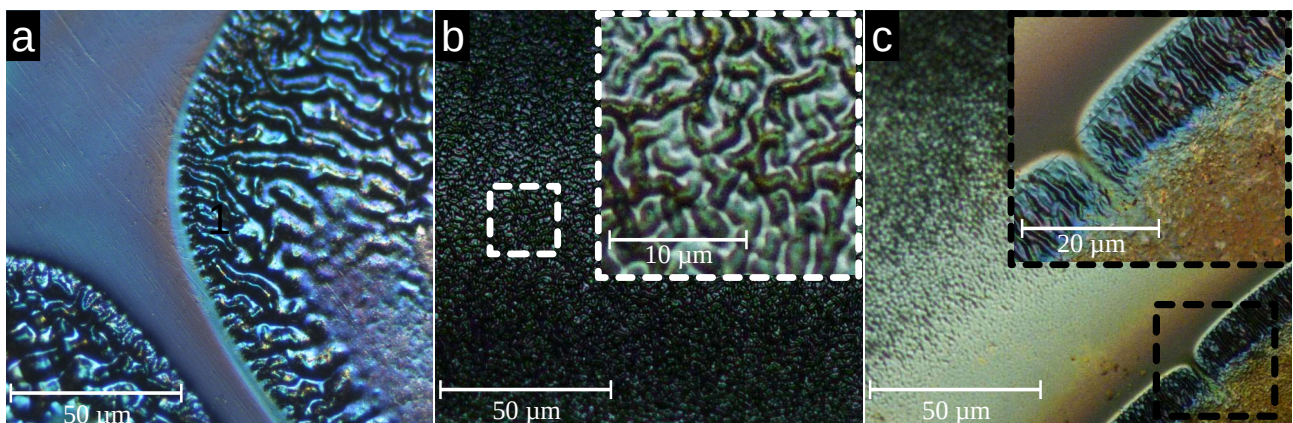


Figure 68 : Images optiques de la surface de SUN-1 (a) et des zones homogènes (b) et la frontière d'une zone globulaire (c) de SUN-2 au grossissement x50 avec des détails en x100

En effet, SUN-1 présente une glaçure lisse avec des zones de couleurs assez distinctes, certaines franchement bleues (cf. Figure 68-a), d'autres tirant plutôt vers le beige. Des observations similaires avaient été effectuées par Patrice Lehuédé lors de son analyse préalable non publiée de G-lisse. Il avait également constaté que les zones beiges correspondaient à de très fins cristaux situés sous la surface. Enfin, il avait noté que l'ajout d'une goutte de liquide d'indice sur la surface de cet échantillon fait « disparaître » ces différences de couleurs et la surface, suggérant qu'il s'agit de couleurs principalement interférentielles faisant intervenir la surface de l'échantillon.

SUN-1 possède également à sa surface des structures globulaires ressemblant à celles des glaçures de type « goutte d'huile », sans l'aspect argenté. L'examen de ces structures au microscope y révèle la présence de plissures, avec au centre des zones d'aspect plus rugueux (cf. Figure 68-a). De telles plissures, néanmoins un peu plus petites, sont également présentes sur la glaçure de SUN-2 (cf. Figure 68-b). Sur cet échantillon, la densité de plissure semble diminuer à proximité des structures globulaires, dans lesquelles, comme pour SUN-1, des plissures plus larges sont observées, mais cette fois uniquement en leur bordure (cf. Figure 68-c). Elles possèdent un centre d'aspect plus rugueux au niveau desquels des structures dendritiques bien définies semblent apparaître.

Cet aspect plissé avait également été observé par Patrice Lehuédé sur G-plissé, qui avait alors comparé cet aspect au défaut des verres flottés qualifié de « bloom » [223–225]. Ce genre de défaut apparaît généralement après une trempe thermique sous air qui cause une oxydation de l'étain, créant à la surface du verre une pellicule avec un coefficient de dilatation plus faible que celui du verre sous-jacent, entraînant des contraintes de compression qui ont tendance à se relâcher en causant ce genre d'ondulation de la surface.

2) Caractérisation chimique et structurale

Pour enrichir son étude, Patrice Lehuédé avait préparé des sections de G-lisse et G-plissé qu'il a analysées par SEM-EDS. Ses observations par SEM ont révélé la présence de couches de cristaux dendritiques sous la surface des deux échantillons (cf. Figure 69, page suivante).

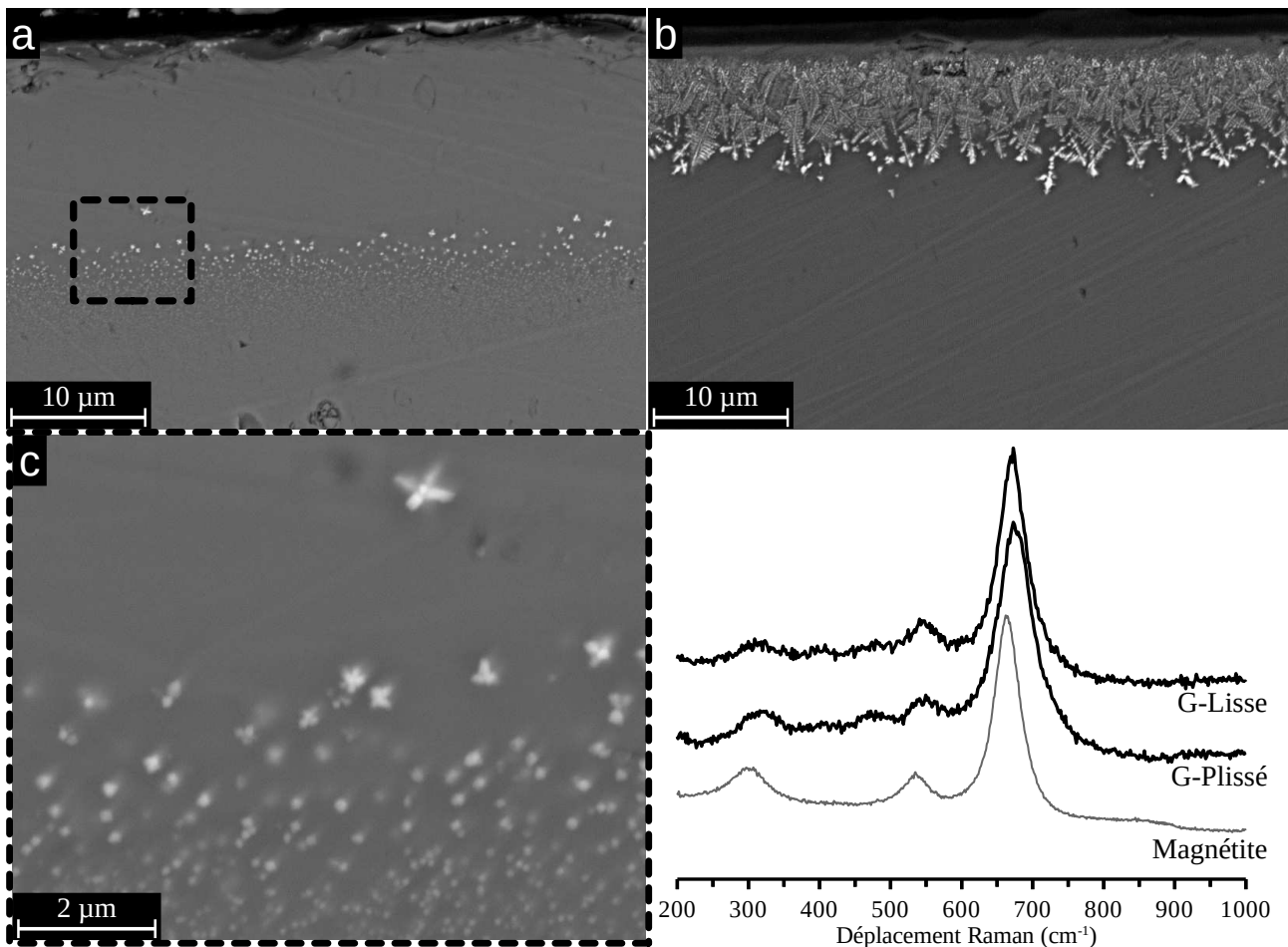


Figure 69 : Images SEM (© Partice Lehuédé) (BSE, 10 kV, grossissement x2000) de la section de G-lisse (a) et G-plissé (b), détail de G-lisse au grossissement x10000 (c) et spectres Raman obtenus sur les cristaux de ces deux échantillons

Ces couches présentent néanmoins des morphologies assez différentes : celle de G-lisse est séparée de la surface par une couche sans cristaux d'environ 15 µm (cf. Figure 69-a). Les cristaux dendritiques, dont les analyses EDS ont révélé qu'ils étaient riches en fer et en aluminium, font quelques centaines de nanomètres pour les plus proches de la surface et leur dimension diminue rapidement plus en profondeur (cf. Figure 69-c). Au contraire, celle de G-plissé est plus rapprochée de la surface (à environ 1 à 2 µm) et possède des dendrites plus densément réparties et beaucoup plus développées, atteignant parfois plusieurs microns (cf. Figure 69-b). Cette couche, probablement liée à une oxydation superficielle, pourrait expliquer les plissements en rendant la surface plus rigide à la manière du « bloom » décrit sur les verres flottés.

Des analyses par spectroscopie Raman ont été effectuées au CEMES pour compléter ces observations. Elles ont révélé que les cristaux dendritiques observés sur G-lisse et G-plissé étaient des spinelles proches de la magnétite compte-tenu de la correspondance des spectres avec la référence utilisée. Les légers décalages de la raie principale observés par rapport à la référence ainsi que la présence d'une bosse large de faible intensité autour de 480 cm⁻¹ pourraient être expliqués par la présence de substitutions par l'aluminium.

De plus, des zones beiges en microscopie optique localisées à des profondeurs variables de G-lisse ont également été observées par SEM. Celles-ci contiennent des cristaux parallélépipédiques

riches en aluminium, silicium et fer, peut-être de la sillimanite ($\text{Al}_2\text{O}(\text{SiO}_4)$) substituée au fer¹⁵ et de petits cristaux très riches en fer.

Pour vérifier la présence de cristaux comparables sur SUN-1 et SUN-2, des analyses surfaciques de la glaçure irisée et des structures globulaires (str. Glob.) de ces deux échantillons ont été effectuées par XRD (cf. Figure 70).

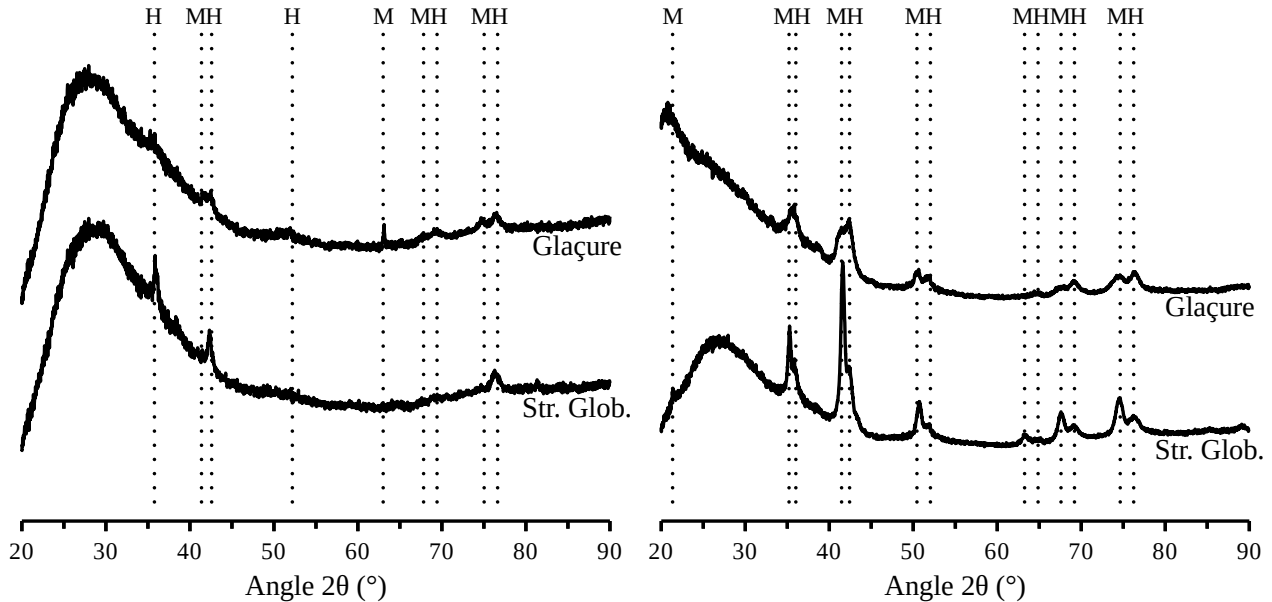


Figure 70 : Diffractogrammes obtenus sur les surfaces de SUN-1 (gauche) et SUN-2 (droite) avec attribution des pics (M = magnétite et H = hercynite)

Ces diffractogrammes montrent la présence de plusieurs espèces de spinelles dans les deux échantillons, particulièrement notable vu le dédoublement des pics sur les diffractogrammes de SUN-2. La position des pics correspond à la magnétite et l'hercynite, quoique la présence de maghémite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) n'est pas à exclure, car ses pics sont très proches de ceux de la magnétite. De plus, les pics associés à ces phases sont beaucoup plus intenses sur SUN-2 (plissé) que sur SUN-1 (lisse), suggérant qu'ils sont présents en quantité plus importante dans celui-ci. Cette tendance est cohérente avec la différence de densité de cristaux observée au SEM sous les surfaces de G-plissé et G-lisse et l'explication des plissures par un phénomène similaire au « bloom ».

Bilan global

Les caractérisations chimiques et structurales d'échantillons de récréations traditionnelles sortis du four en cours de cuisson ont permis de documenter la croissance des dendrites de phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, tout d'abord en vérifiant que cette cristallisation avait effectivement lieu au cours du refroidissement. De plus, ils ont permis de formaliser le mécanisme de leur croissance, en proposant un phénomène alimenté par la dissolution de nanoparticules de spinelle riches en fer se formant au cours de la montée en température et catalysé par la diffusion de cations divalents vers la surface de la glaçure. Les analyses microstructurales des cristaux à différentes étapes de leur croissance ont

15- Au vu de leur morphologie en section et de leur composition, il pourrait également s'agir de mullite substituée au fer.

également révélé qu'ils se chargeaient en aluminium en grandissant, suggérant que cet élément stabilise cette phase.

Même si ces recréations présentent de nombreuses propriétés très similaires aux échantillons anciens (présence de phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ dendritique, diffusion d'ions divalents à la surface...), quelques différences ont également été constatées, en particulier sur la recréation sortie en fin de cycle thermique. En effet, celle-ci présentait plusieurs phases en plus de la phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, en particulier du spinelle riche en magnésium et aluminium et de l'hématite. Ces trois phases ont des plans communs bien définis pour lesquels une épitaxie est possible. Leur présence suggère que les conditions de refroidissement de cette série d'échantillons étaient assez différentes de celles des échantillons anciens. La composition de la matière première peut également jouer un rôle dans ces différences.

Cette série de recréations a été complétée par l'étude *in-operando* en température de plusieurs matières premières, dont celle utilisée pour fabriquer leur glaçure. Malgré quelques difficultés expérimentales (dues vraisemblablement à la réaction du standard de platine avec les matières et à une démixtion lors du remplissage des capillaires), ces analyses ont tout de même montré que l'indialite et l'anorthite se forment pendant la montée en température. La formation de cette dernière semble dépendre fortement de la quantité de calcite dans la matière première, ce qui est cohérent avec sa composition. De plus, elles ont révélé la formation transitoire d'augite pendant la montée en température. La cristallisation de phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ n'a cependant pas été observée, probablement à cause de la démixtion et des conditions en capillaires peu comparables à celle d'un four conventionnel.

Enfin deux recréations de glaçures noires à reflets bleus de Sūn Jiànxìng ont été étudiées et comparées à deux échantillons de même type fabriqués par Jean Girel. Ces analyses ont révélé la présence de cristaux dendritiques sous la surface de la glaçure, mais d'une nature différente de ceux des glaçures brunes : il s'agit ici d'un mélange de magnétite et d'hercynite et non de phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Les observations ont également mis en valeur des spécificités quant à la morphologie de la surface des échantillons, tantôt lisse, tantôt plissée. La présence d'un plus grand nombre de dendrites sous les surfaces plissées pourrait diminuer le coefficient de dilatation thermique de la surface, causant lors du refroidissement un phénomène similaire au « bloom » décrit sur les verres flottés.

Chapitre V : Étude de l'influence d'une sélection de paramètres environnementaux

Pour compléter les études décrites dans le chapitre précédent, les matières premières disponibles ont été chauffées dans des conditions contrôlées pour vérifier l'influence de certains paramètres environnementaux, comme l'atmosphère, la durée ou la température maximale atteinte par exemple. Pour recontextualiser les échantillons, un résumé succinct des cycles thermiques réalisés est donné au début de chaque partie de ce chapitre. Tous les détails de ces cycles sont indiqués au Chapitre II, D, 1), * Élaboration d'échantillons de matière première chauffée page 74.

A – Influence de l'atmosphère et de la durée du cycle thermique sur la surface de la glaçure

Cette partie présente les analyses des échantillons de matières premières Jish1, Fuj1 et Fuj2 ayant subi les cycles thermiques CP-C1 à CP-C4. Pour rappel, le cycle CP-C1 est un cycle thermique long, avec une durée approximativement doublée pour chaque segment par rapport à CP-C2, CP-C3 et CP-C4 dont les durées sont identiques. Les atmosphères de CP-C1 et CP-C2 sont toutes deux faiblement oxydantes obtenues à l'aide d'un piège à oxygène à base de tournures de zirconium, celle de CP-C3 est ambiante et celle de CP-C4 neutre, obtenue par la combinaison d'un piège à oxygène et d'un flux d'argon. Cependant, à la suite du cycle CP-C4, le tube de mullite servant de chambre au four a été trouvé fendu, rendant les conditions atmosphériques de ce cycle incertaines.

1) Observations optiques et caractérisation globale

Tout d'abord, quel que soit le cycle thermique, les glaçures fabriquées à partir de la terre Fuj2 sont visuellement très différentes des autres : leur glaçure est plus vitrifiée et noire légèrement translucide, comme le suggère la possibilité de deviner la pâte par transparence là où elle est plus fine. Cette matière première contient davantage d'oxyde de calcium (8,4 %w) que Fuj1 et Jish1 (0,66 %w et 2,02 %w respectivement), un oxyde jouant habituellement le rôle de fondant ce qui peut ainsi expliquer pourquoi la vitrification est favorisée lors de la chauffe.

Les observations effectuées par microscopie optique confirment cette tendance, en montrant que les glaçures fabriquées à partir de Fuj2 sont davantage vitrifiées que celles obtenues à partir de Jish1 et Fuj1 qui, au contraire, sont toujours recouvertes de cristaux densément répartis (cf. Figure 71).

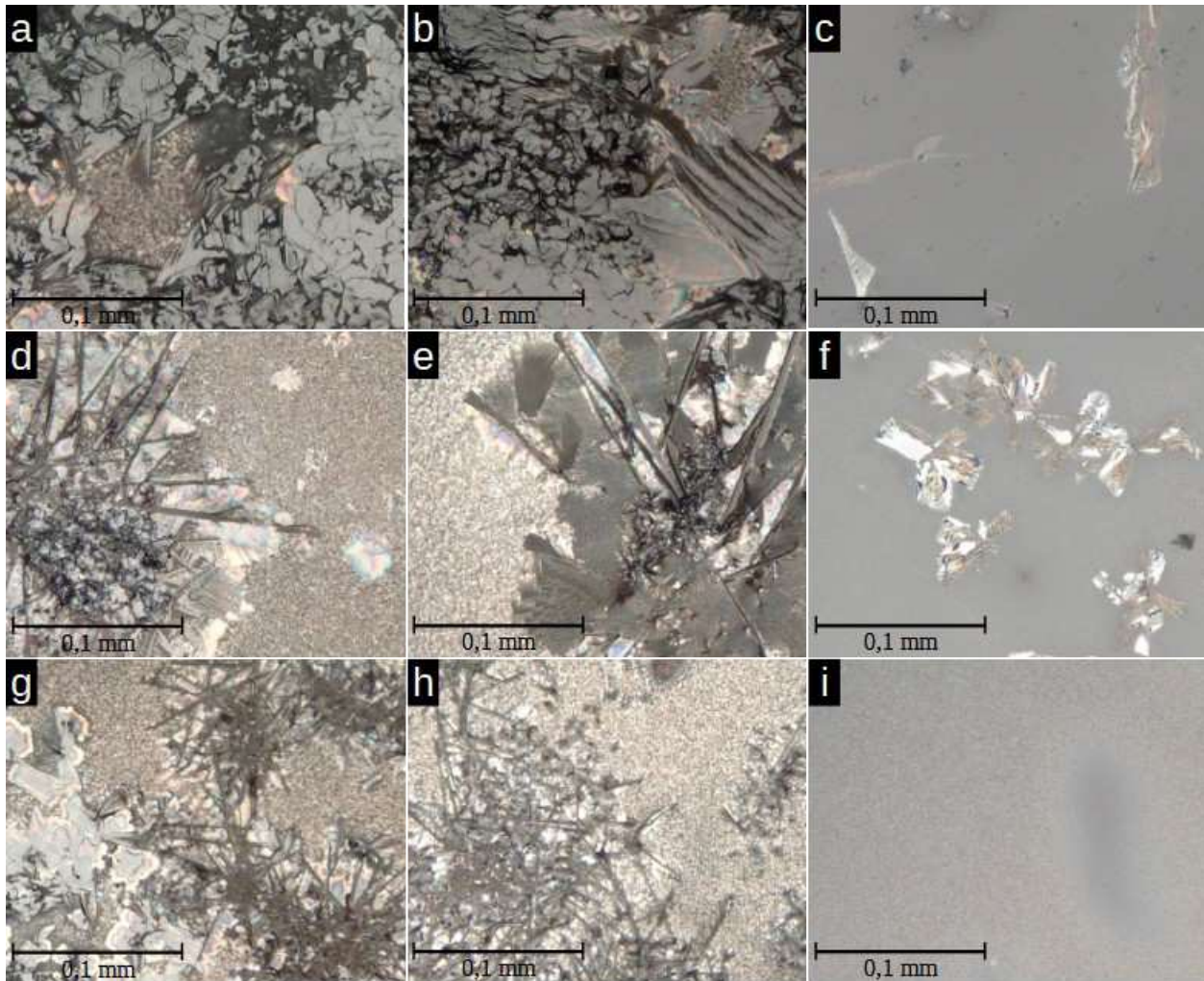


Figure 71 : Images optiques (grossissement x500) de Jish1-CP-C1 (a), Fuj1-CP-C1 (b), Fuj2-CP-C1 (c), Jish1-CP-C2 (d), Fuj1-CP-C2 (e), Fuj2-CP-C2 (f), Jish1-CP-C3 (g), Fuj1-CP-C3 (h) et Fuj2-CP-C3 (i)

Pour le cycle CP-C1, les échantillons Jish1-CP-C1 (cf. Figure 71-a) et Fuj1-CP-C1 (cf. Figure 71-b) sont assez similaires, présentant principalement des cristaux de quelques dizaines de microns et de formes géométriques diverses qui réfléchissent la lumière, ainsi que quelques cristaux irisés souvent disposés à proximité de zones recouvertes de dendrites d'une taille inférieure à $10\ \mu\text{m}$. Fuj2-CP-C1 au contraire (cf. Figure 71-c), présente uniquement de longues structures dendritiques de plusieurs dizaines de microns et disposés de manière éparse à la surface de la glaçure.

Les échantillons Jish1-CP-C2 (cf. Figure 71-d) et Fuj1-CP-C2 (cf. Figure 71-e) sont très différents de ceux faits avec les mêmes matières premières ayant subi le cycle CP-C1. Leur aspect est à nouveau comparable entre eux, avec une glaçure brune recouverte de petits cristaux irisés densément répartis et de défauts similaires aux fleurs de mullite décrites dans la littérature [163]. Fuj1-CP-C2 présente néanmoins dans ces défauts beaucoup plus de structures en forme d'éventail que Jish1-CP-C2, qui possède exclusivement de longues aiguilles isolées. Des cristaux hexagonaux

ont également été observés à la surface de Fuj1-CP-C2 et quelques amas de cristaux géométriques réfléchissant la lumière sur Jish1-CP-C2, généralement positionnés au centre de grandes structures dendritiques. Fuj2-CP-C2 (cf. Figure 71-f) quant à lui ressemble fortement à Fuj2-CP-C1, avec des structures dendritiques assez longues et isolées.

Les échantillons Jish1-CP-C3 (cf. Figure 71-g) et Fuj1-CP-C3 (cf. Figure 71-h) obtenus sous atmosphère ambiante sont assez similaires à ceux obtenus sous atmosphère faiblement oxydante. Leur observation révèle qu'ils contiennent beaucoup plus de fleurs de mullite que leurs homologues du cycle CP-C2. De plus, aucun ne présente les structures en forme d'éventail comme celles observées sur Fuj1-CP-C2 (cf. Figure 71-e). Des cristaux géométriques réfléchissant la lumière rappelant ceux Jish1-CP-C1 et Fuj1-CP-C1 ont également été aperçus à la surface de Jish1-CP-C3. Fuj2-CP-C3 (cf. Figure 71-i) présente quant à lui une glaçure d'aspect un peu granuleux avec quelques zones ovoïdes moins granuleuses, probablement situées proches de cristaux de quartz. De plus, aucune longue structure dendritique n'a été constatée à sa surface.

Pour ce qui est du cycle CP-C4, Fuj2-CP-C4 présente une glaçure très lisse et vitrifiée, sans formation dendritique à sa surface. Jish1-CP-C4 et Fuj1-CP-C4 possèdent des glaçures recouvertes de petites dendrites avec quelques fleurs de mullite assez rares, dont certaines avec des structures en éventail et des cristaux géométriques réfléchissant la lumière. Ces derniers sont répartis sur de larges zones de plusieurs millimètres sur Jish1-CP-C4. Des cristaux hexagonaux noirs ont été également observés sur cet échantillon. De plus, de petits cristaux blancs ont été aussi observés sur tous ces échantillons.

Les caractérisations croisées par XRD, spectroscopie Raman et SEM-EDS ont permis de mettre en évidence une grande diversité de phases présentes à la surface de ces échantillons. Les résultats sont résumés dans le Tableau 12. Compte-tenu du problème expérimental ayant eu lieu pendant CP-C4, les résultats obtenus sur les échantillons chauffés au cours de ce cycle thermique ne sont pas indiqués dans le tableau. Certains résultats notables sur cette série d'échantillons seront tout de même décrits par la suite.

Échantillon	$\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hématite	Mullite	Indialite	Quartz	Cristobalite	Autre
Jish1-CP-C1	XRD/SR	XRD/SR	XRD		XRD	XRD	
Fuj1-CP-C1	XRD/SR	XRD/SR		XRD			Spinelle ¹⁶ (SR)
Fuj2-CP-C1	XRD/SR				XRD/SR		Spinelle (SR) Zircon (EDS)
Jish1-CP-C2	XRD/SR	SR	XRD				Spinelle (SR) P.brookite (SR/EDS) Baddeleyite (EDS)
Fuj1-CP-C2	XRD/SR	SR		XRD/SR			P.brookite (EDS) Zircon (EDS) Baddeleyite (EDS)
Fuj2-CP-C2	SR				XRD/SR		Baddeleyite (SR)
Jish1-CP-C3	XRD/SR	SR	XRD				P.brookite (SR/SEM) Corindon (SEM)

16- Spinelle désigne ici une espèce de structure spinelle identifiée grâce à son spectre Raman. Il peut s'agir de spinelle nominal alumino-magnésien, de magnétite, d'hercynite ou encore de maghémite.

Échantillon	ϵ -Fe ₂ O ₃	Hématite	Mullite	Indialite	Quartz	Cristobalite	Autre
Fuj1-CP-C3	XRD/SR		XRD	XRD/SR		XRD	P.brookite (SR/SEM)
Fuj2-CP-C3	XRD/SR	SR			XRD/SR	XRD	Spinelle (SR) P.brookite (SR) Zircon (EDS/SR)

Tableau 12 : Phases identifiées par XRD, Spectroscopie Raman (SR) et SEM-EDS¹⁷ à la surface des échantillons issus des cycles thermiques de la série CP

La phase ϵ -Fe₂O₃ a été identifiée sur tous les échantillons en quantité significativement variable : elle n'est présente que dans les zones de petits cristaux dendritiques d'une taille inférieure à 10 μ m sur Fuj1-CP-C1 et Jish1-CP-C1 alors qu'elle constitue de manière nette la phase majoritaire sur les échantillons faits à partir des mêmes matières premières mais ayant subi les cycles CP-C2 et CP-C3. L'hématite au contraire est la phase majoritaire de Fuj1-CP-C1 et Jish1-CP-C1 alors qu'elle est très rare, voire non détectée sur ceux où la phase ϵ -Fe₂O₃ est majoritaire. Cette différence suggère, pour ces deux matières premières, que l'augmentation du temps de cuisson favorise fortement la croissance de l'hématite par rapport à la phase ϵ -Fe₂O₃.

Les échantillons fabriqués à partir de Fuj2 contiennent quant à eux toujours de la phase ϵ -Fe₂O₃ et seul Fuj2-CP-C3, qui a été chauffé sous atmosphère ambiante, contient de rares cristaux d'hématite. Cette différence par rapport aux autres échantillons peut suggérer que sa composition beaucoup plus riche en calcium favorise la stabilité de la phase ϵ -Fe₂O₃ par rapport aux autres oxydes de fer, comme il avait été montré avec la méthode de synthèse par sol-gel [161]. Il est cependant nécessaire de noter que ces dendrites sont certes bien développées, mais relativement rares et isolées vu la très faible intensité des pics sur les diagrammes, ce qui suggère que la quantité élevée de calcium limite également les cristallisations en général. La présence d'hématite uniquement sur Fuj2-CP-C3 peut suggérer qu'une atmosphère plus oxydante peut éventuellement favoriser sa croissance.

Ces deux oxydes de fer ont également été identifiés sur les échantillons Fuj1-CP-C4 et Jish1-CP-C4. L'hématite est présente sur les larges zones de plusieurs millimètres contenant les cristaux géométriques réfléchissant la lumière sur Jish1-CP-C4.

La mullite a été détectée uniquement sur les échantillons chauffés pendant une durée plus courte, suggérant qu'un temps de cuisson plus important prévient sa cristallisation. De plus, au vu des observations microscopiques et du fait que les pics de la mullite sont plus intenses sur les échantillons ayant subi le cycle CP-C3 que CP-C2, il semble qu'une atmosphère plus oxydante favorise la formation de mullite en surface de glaçure. Cette observation est cohérente avec la littérature, qui a montré que les ions ferriques, plus nombreux en conditions oxydantes, peuvent entrer dans la mullite et favoriser sa croissance [191,194].

De l'indialite a été trouvée sur tous les échantillons préparés avec la terre Fuj1, ce qui suggère que la composition de la glaçure joue un rôle important dans sa formation. Il semble néanmoins que l'atmosphère joue également un rôle dans sa formation, puisque des cristaux de cette nature ont été trouvés sur Jish1-CP-C4 et Fuj1-CP-C4. Sachant d'après le chapitre précédent que ces cristaux se

17- Pour éviter de surcharger le tableau, la mention EDS n'est précisée que pour les phases de la colonne « autre ».

forment au cours de la montée en température, il est possible de conjecturer qu'une atmosphère plus réductrice favorise la formation de cette phase, en supposant que la chambre du four se soit fracturée à haute température après sa cristallisation. Cette dernière hypothèse ne pouvant pas être vérifiée, elle est à prendre avec prudence, même si elle est cohérente avec la littérature, puisqu'il a été montré qu'une atmosphère réductrice permettait sa cristallisation dans certains systèmes vitreux, avec une incorporation d'ions ferreux dans sa structure [226].

Quelques spectres Raman associés à des spinelles ont été enregistrés sur plusieurs des échantillons présentés et sur Jish1-CP-C4. La nature exacte de ces espèces étant assez délicate à identifier uniquement à partir de leur spectre Raman, il est impossible de conclure avec certitude s'il s'agit d'une espèce plutôt riche en fer ou en magnésium par exemple. De plus, leur morphologie n'étant pas particulière, il n'est pas possible de les repérer au SEM pour faire une étude de leur composition par EDS.

D'autres phases cristallines, comme du quartz, de la cristobalite, de la pseudobrookite ou du zircon ont été observées sur plusieurs échantillons. Ces phases ne semblent pas illustrer de tendance particulière. Elles sont courantes dans les échantillons archéologiques et proviennent le plus souvent directement de la matière où d'une transformation simple de cristaux très spécifiques de cette dernière (comme la pseudobrookite qui vient de la réaction de l'anatase avec la matrice vitreuse riche en fer).

Enfin, de la baddeleyite (ZrO_2) a également été identifiée sur tous les échantillons soumis au cycle CP-C2 (cf. Figure 72).

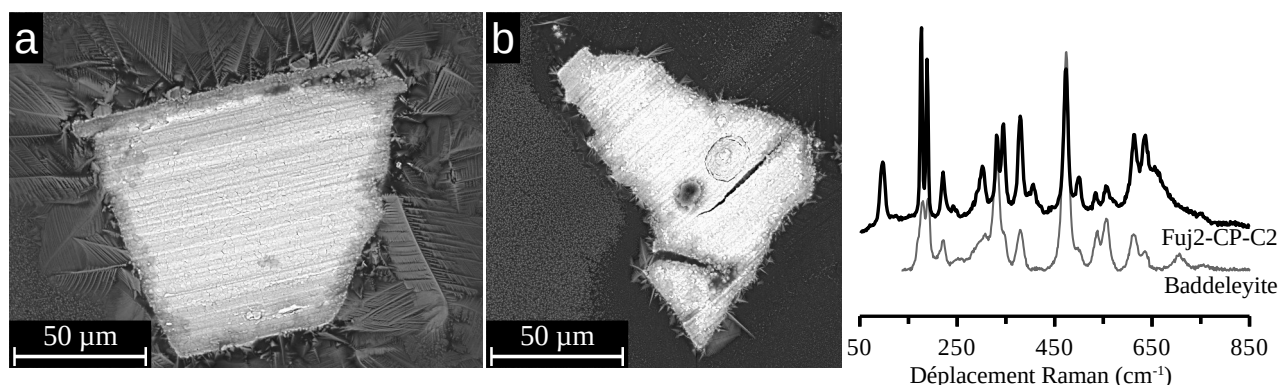


Figure 72 : Images SEM (BSE, 18 kV, grossissement $\times 1000$) de morceaux de baddeleyite à la surface de Jish1-CP-C2 (a) et Fuj1-CP-C2 (b) et exemple de spectre Raman associé

Au vu de la morphologie des cristaux associés à cette phase, ils proviennent sans doute de fragments d'une tournure de zirconium du piège à oxygène qui ont sauté et se sont déposés à la surface des échantillons. Il est intéressant de noter qu'ils ont servi de point d'accroche pour la croissance de longues dendrites de phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, comme le font les cristaux de zircon.

Pour documenter davantage les spécificités liées à trois structures cristallines riches en fer apparaissant sur les différents échantillons : les longues dendrites d'oxyde de fer, les cristaux d'indialite et les cristaux géométriques réfléchissant la lumière, des analyses approfondies ont été effectuées. Pour les deux premières, des lames minces ont été préparées par FIB et ont permis de documenter en plus la composition de quelques cristaux de spinelle et de mullite.

2) Dendrites d'oxydes de fer

L'imagerie SEM effectuée sur les différents échantillons de la série présentée en Figure 73 a confirmé la présence de petites dendrites sur les échantillons fabriqués à partir des matières Jish1 et Fuj1 ayant subi les cycles CP-C2 et CP-C3.

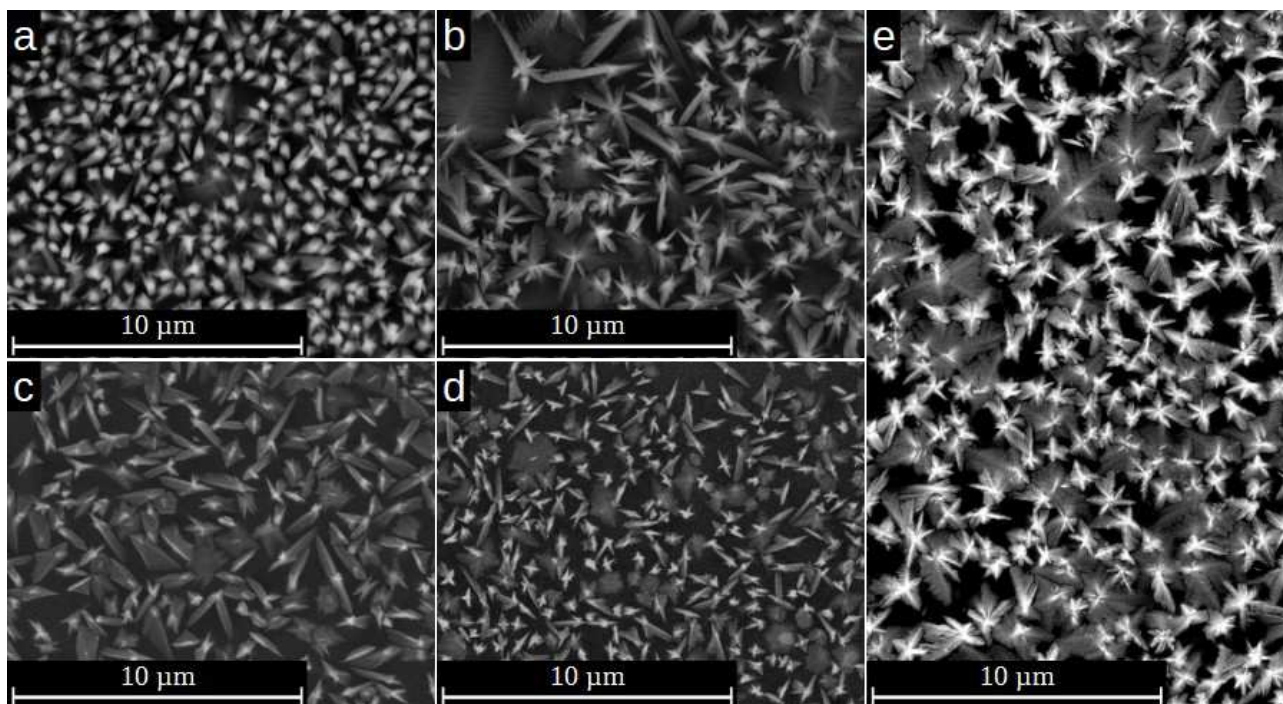


Figure 73 : Images SEM (BSE, 18 KV, grossissement x5000) des petites dendrites à la surface des échantillons Jish1-CP-C2 (a), Fuj1-CP-C2 (b), Jish1-CP-C3 (c), Fuj1-CP-C3 (d) et BG-01 (e)

Ces dendrites sont très similaires à celles de phase ϵ -Fe₂O₃ présentes dans les échantillons anciens (cf. Figure 73-e). Leur présence à la fois sur les échantillons des cycles CP-C2 et CP-C3 suggère que l'atmosphère n'influence pas de manière critique leur cristallisation. Il semble de manière qualitative que leur taille est légèrement plus faible que celles visibles dans BG-01, suggérant un refroidissement peut-être un peu plus lent des objets archéologiques.

Il a été remarqué que leur taille décroît à proximité des cristaux de pseudobrookite et d'indialite, ce qui suggère que le pompage du fer de la glaçure qui a lieu pour former ces espèces prévient la formation de la phase ϵ -Fe₂O₃ à leur proximité.

Au contraire de la pseudobrookite et de l'indialite, d'autres phases peuvent servir de support à la phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ qui forme ainsi des structures dendritiques bien plus larges (cf. Figure 74).

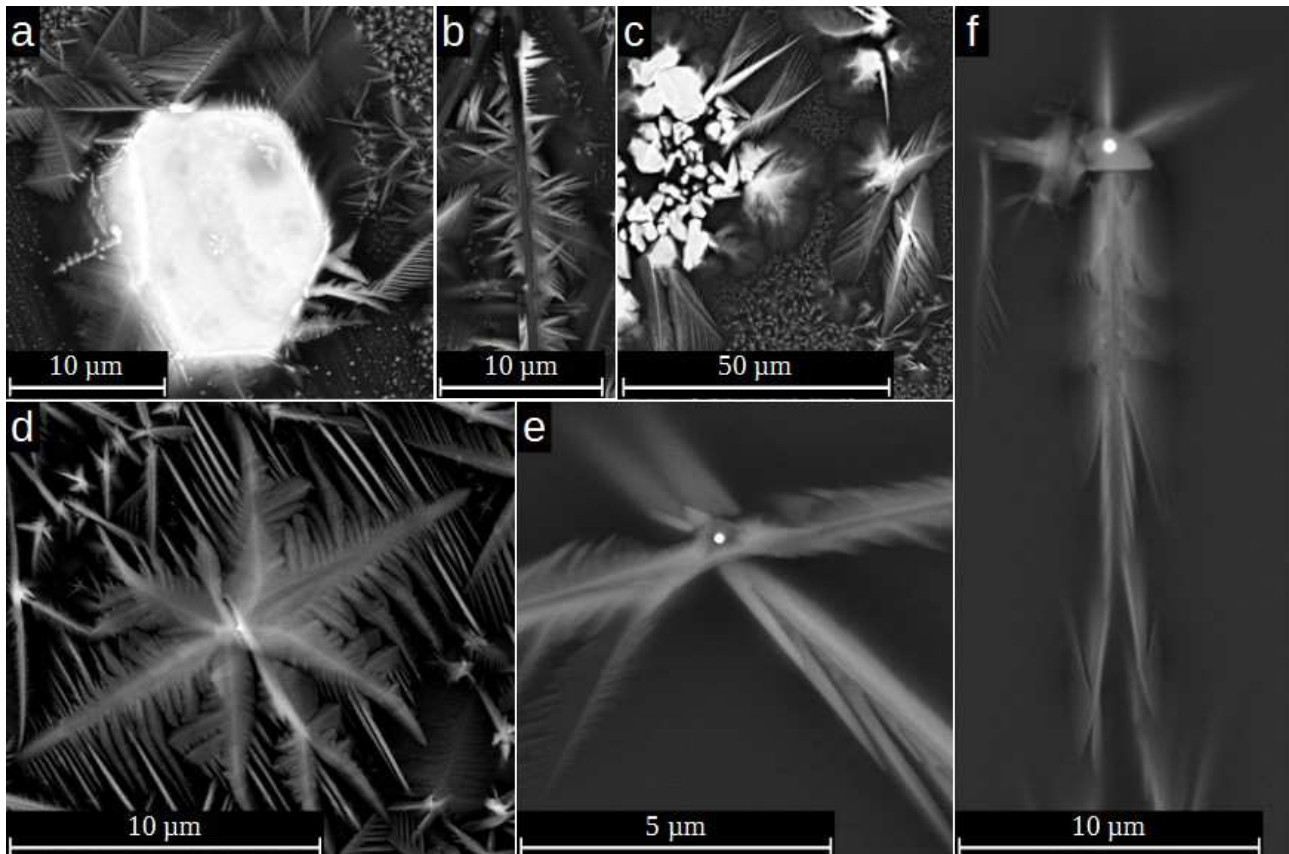


Figure 74 : Images SEM (BSE, 18 kV, grossissements $\times 1000$ à $\times 10000$) de grosse dendrites poussant sur un cristal de zircon sur Fuj1-CP-C2 (a), une aiguille de mullite sur Jish1-CP-C3 (b), des cristaux géométriques riches en fer sur Jish1-CP-C3 (c) et des nanoparticules sur Fuj1-CP-C2 (d) et Fuj2-CP-C2 (e et f)

Certaines comme le zircon (cf. Figure 74-a) (ou la baddeleyite évoquée précédemment) proviennent d'impuretés présentes au départ, alors que d'autres, comme la mullite, déjà documentée dans la littérature [162], ou les cristaux géométriques riches en fer sont formés en cours de cuisson (cf. Figure 74-b et c). Des supports de germinations bien plus petits comme des nanoparticules ont également été observés de manière très fréquente, en particulier sur Fuj2-CP-C1, Fuj1-CP-C2 et Fuj2-CP-C2 (cf. Figure 74-d à f). Les analyses EDS effectuées sur quelques-unes d'entre-elles à la surface de Fuj2-CP-C1, bien que peu précises à cause du volume analysé bien plus important que les seules particules, ont révélé des enrichissements élémentaires divers, notamment en magnésium, cuivre, chrome, nickel et même en iridium pour une particule. Ces compositions variées suggèrent qu'il s'agit, comme pour le zircon, d'impuretés présentes à la base dans la matière première et non de composés qui cristallisent en cours de cuisson comme la mullite.

Pour caractériser les longues dendrites de phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, des lames minces ont été réalisées par FIB sur Jish1-CP-C2 (une parallèle à une dendrite primaire et une perpendiculaire à des dendrites secondaires), Fuj1-CP-C2 (une parallèle à des dendrites primaires autour d'une particule servant de centre de germination), Fuj2-CP-C2 (une parallèle à une dendrite primaire et une perpendiculaire à des dendrites secondaires), Jish1-CP-C3 (une sur des dendrites croissant sur de la mullite) et Jish1-

CP-C4 (une parallèle à une dendrite primaire). Les sept lames ont été étudiées par STEM-EDS (cf. Figure 75). Des cartographies TKD ont également été réalisées sur plusieurs de ces lames mais se sont révélées peu concluantes à cause de problèmes expérimentaux (instabilité du FIB).

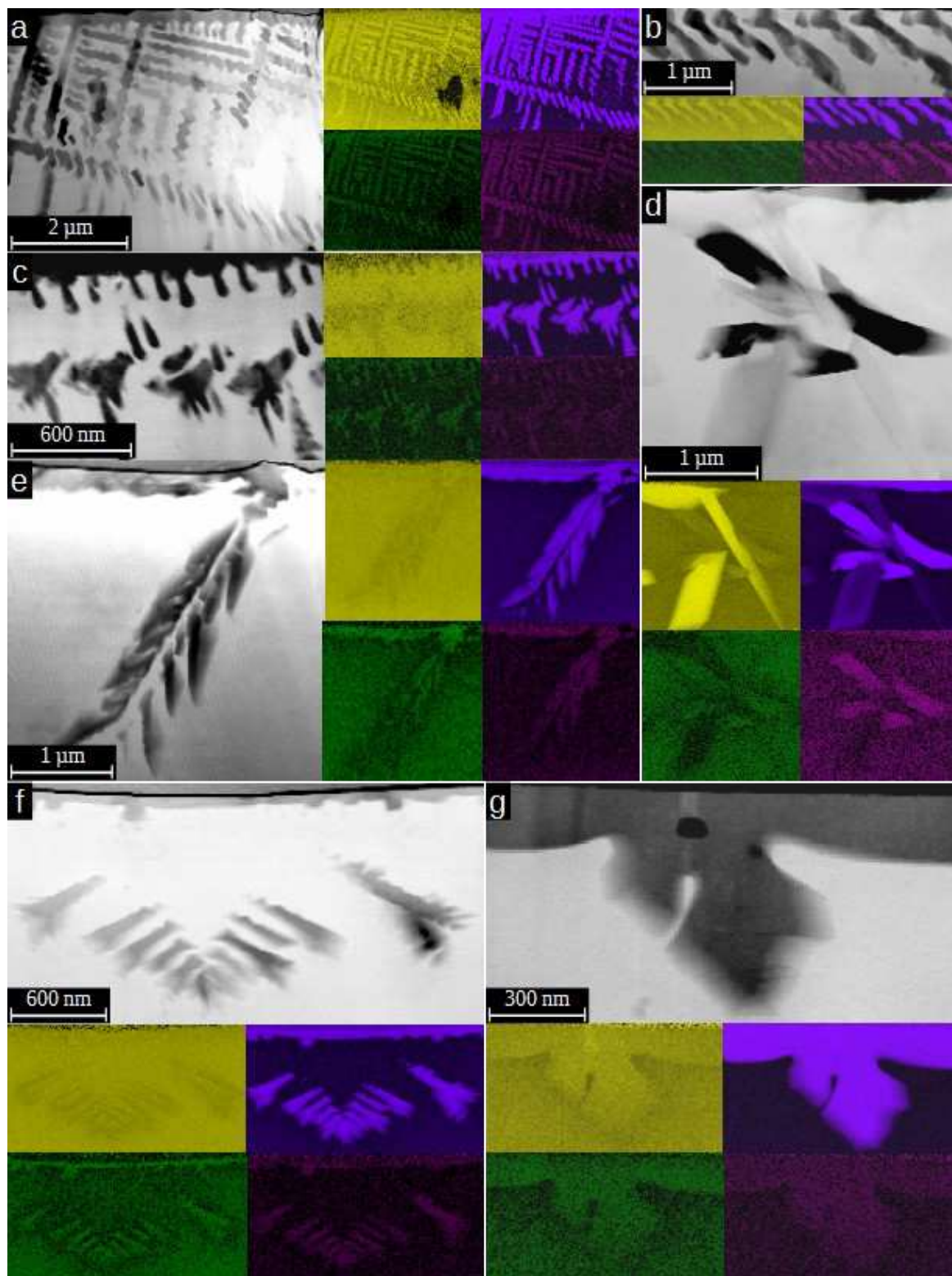


Figure 75 : Images STEM (200 kV, grossissements $\times 50000$ à $\times 150000$) des lames effectuées sur Jish1-CP-C2 (a et b), Jish1-CP-C4 (c), Jish1-CP-C3 (d), Fuj2-CP-C2 (e et f), Fuj1-CP-C2 (g) et cartographie EDS élémentaires associées (Al (jaune), Mg (vert), Fe (violet) et Ti (rose))

D'un point de vue morphologique, les dendrites de ces lames ont des formes très similaires à celles des échantillons archéologiques. Les cartographies élémentaires y révèlent la présence d'aluminium, de titane et de magnésium, comme dans celles des échantillons archéologiques ou des recreations. Les analyses TKD ont révélé qu'il s'agit toujours de dendrites de phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, à l'exception de la dendrite à la surface de la lame de Jish1-CP-C4 qui a été identifiée comme de l'hématite (celle en profondeur de la même lame a été identifiée comme de la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Compte-tenu des MAD¹⁸ très corrects pour ces deux phases (autour de $0,2^\circ$ pour l'hématite et de $0,4^\circ$ pour celles de phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$), les identifications semblent justes.

Pour vérifier si l'atmosphère a une influence sur les taux de substitution, il est nécessaire de comparer les lames entre elles. Étant chacune disposée sur des grilles différentes, les compositions données à travers les ratios par rapport à l'oxygène n'ont aucun intérêt puisqu'elles ne sont pas comparables. Le tableau suivant présente donc les ratios élémentaires moyens par rapport au fer, l'élément constituant principal des dendrites après l'oxygène, qui peuvent être comparés de manière pertinente car la détection de cet élément n'est pas influencée par les changements de grilles. Ces ratios moyens (et écarts-types associés entre parenthèses), multipliés par 100 pour des raisons de lisibilité, sont présentés dans le Tableau 13.

Échantillon	Al/Fe	Mg/Fe	Ti/Fe	Si/Fe
Jish1-CP-C2	39,2 (9,0)	4,8 (1,4)	2,7 (0,8)	13,44 (11,2)
Jish1-CP-C3	23,3 (1,5)	4,6 (1,6)	2,2 (0,2)	15,9 (5,7)
Jish1-CP-C4 ($\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$)	17,3 (2,5)	3,7 (0,9)	1,0 (0,2)	11,3 (3,9)
Fuj1-CP-C2	23,2 (1,7)	6,6 (0,6)	1,3 (0,2)	3,48 (0,4)
Fuj2-CP-C2	28,2 (8,2)	7,5 (2,1)	2,1 (0,4)	28,3 (38,9)
Jish1-CP-C4 (hématite)	11,0 (1,0)	4,9 (1,5)	0,7 (0,2)	6,3 (1,3)

Tableau 13 : Ratios élémentaires mesurés sur les dendrites d'oxyde de fer des lames minces

La comparaison des ratios élémentaires des échantillons ayant subi le cycle CP-C2 suggère que la composition initiale de la matière première a une forte influence sur les substitutions cationiques dans les dendrites. Il semble y avoir une corrélation assez simple entre les niveaux de substitution par le titane et le magnésium et leur quantité dans la matière première, respectivement de 1,1 %w et 2,45 %w dans Jish1, 0,56 %w et 3,1 %w dans Fuj1 et 0,83 %w et 3,6 %w dans Fuj2. Aucune corrélation n'apparaît cependant de manière évidente avec le taux d'aluminium, puisque les dendrites de Jish1-CP-C2 contiennent bien plus d'aluminium que celles de Fuj2-CP-C2 alors que Jish1 et Fuj2 ont des taux d'aluminium comparables (18,9 %w et 19,1 %w respectivement).

L'atmosphère semble également jouer un rôle important, comme le suggèrent les différences observées entre les trois échantillons fabriqués à partir de Jish1, en particulier sur l'aluminium. Il est tentant, au regard de ces trois échantillons, de supposer qu'une atmosphère plus oxydante limite les substitutions, en conjecturant que la fracture de la chambre du four au cours de CP-C4 a eu lieu avant la cristallisation de la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ et a permis de faire rentrer plus d'air dans la chambre que l'atmosphère ambiante de CP-C3. Même si cette hypothèse est particulièrement avancée, elle aurait du sens d'un point de vue chimique pour l'aluminium, puisqu'une atmosphère plus oxydante

18- Mean Angular Deviation, valeur qui donne une idée de la correspondance entre le cliché de diffraction expérimental et celui calculé par logiciel.

favoriserait l'oxydation des ions ferreux en ions ferriques trivalents et préviendrait donc l'utilisation d'aluminium pour les remplacer. Il convient cependant de prendre cette supposition avec la plus grande prudence car il n'est pas possible de vérifier à quel moment du cycle thermique la fracture de la chambre du four a eu lieu.

Enfin, en comparant les compositions de la dendrite d'hématite et de celle de phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ présentes sur la même lame, il apparaît que l'hématite contient moins d'aluminium que la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, comme il avait été noté sur ZJ-08 dans le chapitre précédent (cf. Tableau 11 page 134).

Il convient également de noter que les écarts-types du ratio Al/Fe sont particulièrement élevés sur Jish1-CP-C2 et Fuj2-CP-C2. Pour comprendre cette grande variabilité des résultats, une analyse plus détaillée des données EDS en fonction de la position des cristaux dans la lame a été effectuée et est présentée dans le Tableau 14.

Échantillon	Al/Fe	Mg/Fe	Ti/Fe	Si/Fe
Jish1-CP-C2 (surface)	18,7 (1,1)	5,2 (0,7)	0,9 (0,1)	4,9 (0,5)
Jish1-CP-C2 (profondeur)	41,0 (6,9)	4,8 (1,4)	2,9 (0,6)	14,2 (11,4)
Fuj2-CP-C2 (surface)	25,4 (2,9)	9,8 (1,6)	2,3 (0,4)	6,9 (4,6)
Fuj2-CP-C2 (profondeur)	24,6 (3,9)	6,3 (1,5)	1,9 (0,4)	13,7 (12,5)

Tableau 14 : Influence de la position des cristaux de phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ dans la lame par rapport à la surface sur sa composition

Ce nouveau regard a mis en évidence des différences de composition assez importantes selon la profondeur de la dendrite dans la glaçure. En effet, il semble que, pour l'échantillon Jish1-CP-C2, les dendrites poussant à l'extrême surface sont beaucoup moins substituées par l'aluminium et le titane que celles juste un tout petit peu plus en profondeur. Au contraire, pour Fuj1-CP-C2, les dendrites de surface et plus en profondeur ont des taux de substitutions comparables pour ces éléments. Il est difficile de tirer une tendance pour le magnésium, car même si les dendrites de surface semblent toujours en contenir davantage, la variabilité des valeurs est très importante.

Cette différence de substitution en aluminium notamment suggère éventuellement que les taux importants de fondants divalents dans Fuj2 favorisent l'homogénéité de la composition de ses dendrites, puisqu'il a été montré dans le chapitre précédent que les cations divalents peuvent catalyser la diffusion des ions ferreux vers la surface pour alimenter la cristallisation. Au contraire dans Jish1, le faible taux de fondant ferait que les dendrites de surface pompent une grande partie du fer disponible pour cristalliser, demandant ainsi aux dendrites plus en profondeur d'incorporer davantage d'aluminium pour le remplacer. Il convient de noter tout de même que la variabilité demeure assez élevée sur ratios mesurés sur les dendrites en profondeur. Celle-ci est probablement due à l'influence de la glaçure sur certains points de mesure, comme l'illustre les ratios Si/Fe.

Pour tenter de documenter davantage l'impact de ces substitutions sur la structure de la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, des affinements Rietveld ont été effectués sur les diffractogrammes des échantillons fabriqués à partir des terres Fuj1 et Jish1 possédant cette phase. Cependant, la relative largeur des pics sur des diffractogrammes n'a pas permis d'obtenir des résultats suffisamment précis pour dégager les tendances : un ajustement correct n'a pu être obtenu qu'à partir des diagrammes de Fuj1-CP-C2, Jish1-CP-C2 et Jish1-CP-C3 (les pics des autres n'étaient suffisamment intenses) et ils ont conduit aux paramètres de maille $a = 5,10 \text{ \AA}$, $b = 8,74 \text{ \AA}$ pour les deux échantillons fabriqués à partir de la matière Jish1 et $b = 8,76 \text{ \AA}$ pour Fuj1-CP-C2. Le paramètre c a été estimé à $9,40 \text{ \AA}$ pour

Jish1-CP-C3, 9,41 Å pour Jish1-CP-C2 et 9,42 Å pour Fuj1-CP-C2. Les valeurs de b et c sont légèrement plus faibles que celles de la référence de la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ pure qui valent respectivement 8,789 Å et 9,437 Å et comparables avec celles déterminées sur les échantillons anciens, suggérant que les substitutions causent principalement une réduction des paramètres b et c.

Une étude plus approfondie des spectres Raman des échantillons Jish1-CP-C2, Jish1-CP-C3 et Jish1-CP-C4 a également été menée par Christophe Faulmann, en particulier sur les pics aux basses fréquences. En sommant entre eux tous les spectres de la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ obtenus sur chaque échantillon pour obtenir un spectre globalement représentatif de l'échantillon, une tendance est apparue (cf. Figure 76).

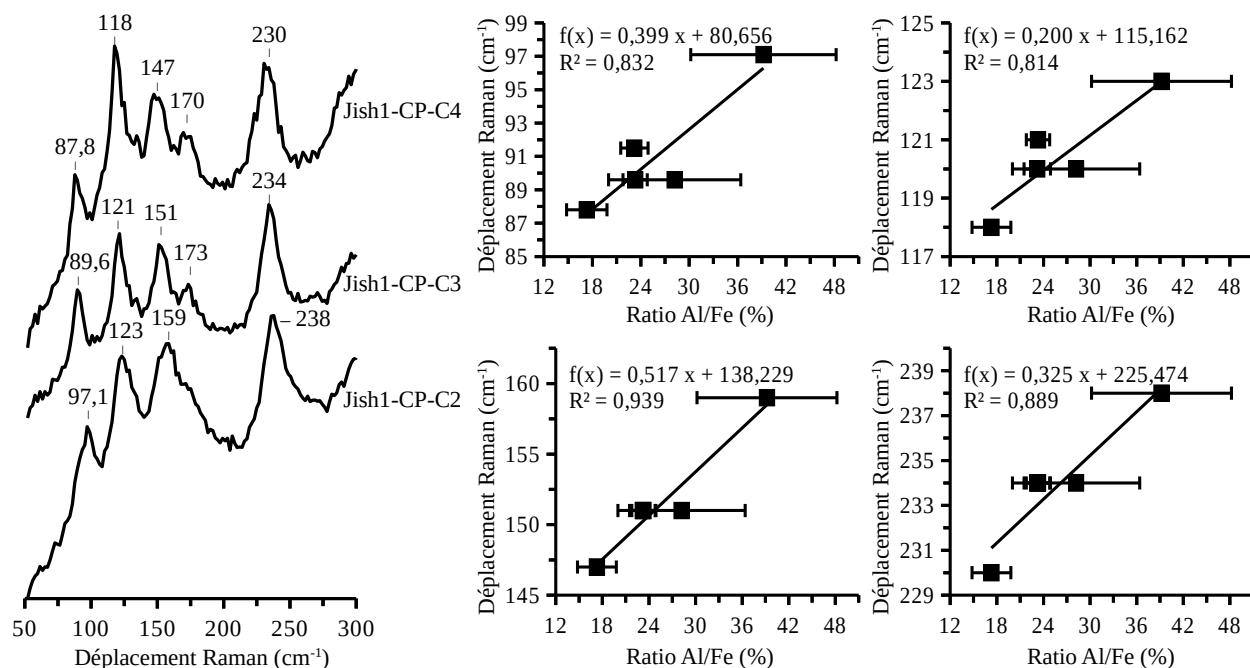


Figure 76 : Spectres Raman sommés de la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ de Jish1-CP-C2 à C4 et positions des pics autour de 93 cm^{-1} , 121 cm^{-1} , 153 cm^{-1} et 234 cm^{-1} en fonction du ratio Al/Fe mesuré par STEM-EDS

En effet, il semble que la position des raies des différents échantillons soit décalée vers les nombres d'onde plus faibles pour des taux de substitution mesurés de la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ plus importants. Les substitutions par l'aluminium étant largement majoritaires, la position des différents pics a été tracée par rapport au ratio moyen Al/Fe, en indiquant en guise de barre d'erreur l'écart-type calculé sur ces valeurs. Ces tracés soulignent bien les tendances observées, cependant, compte-tenu des coefficients de régression relativement faibles (entre 0,814 et 0,939) par rapport au peu de points disponibles, il n'est pas possible de conclure qu'une corrélation linéaire simple existe entre ces deux facteurs.

3) Cristaux d'indialite

Les analyses Raman et XRD ayant confirmé la présence d'indialite sur quelques échantillons des différentes cuissons, des observations SEM ont été effectuées afin d'observer la morphologie de ces cristaux (cf. Figure 77).

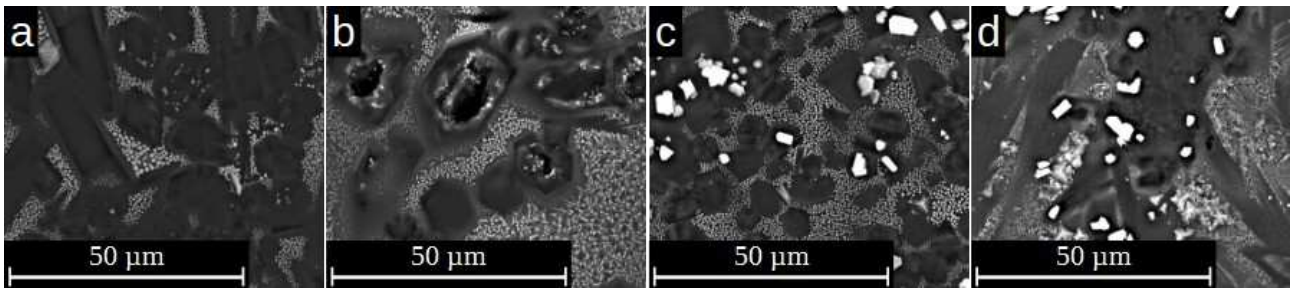


Figure 77 : Images SEM (BSE, 18 kV, grossissement x1000) des cristaux d'indialite sur Fuj1-CP-C2 (a), Fuj1-CP-C2 (b), Jish1-CP-C4 (c) et Fuj1-CP-C4 (d)

Ces analyses ont permis de confirmer leur présence en surface de Fuj1-CP-C2, Fuj1-CP-C3, Fuj1-CP-C4 et Jish1-CP-C4. Ils n'ont néanmoins pas pu être observés sur Fuj1-CP-C1, peut-être en raison du fait que les cristaux détectés par XRD étaient plus en profondeur dans la glaçure. Leur morphologie est très similaire à ceux rencontrés sur la série ZJ, principalement sous forme de plaquettes hexagonales. Comme évoqué précédemment, ils ne servent pas de support de croissance à la phase ϵ -Fe₂O₃, et semblent au contraire la prévenir car des particules sphériques sont observées à leurs alentours au lieu de dendrites. Certains des cristaux d'indialite observés sur Fuj1-CP-C3 sont troués, avec des petites particules brillantes autour des trous. Pour documenter la composition de ces cristaux d'indialite et la nature de ces petites particules, une lame mince a été préparée pour être étudiée en STEM-EDS sur chacun des échantillons présentant cette phase (cf. Figure 78).

Les cartographies EDS montrent (pour celles où la glaçure et les cristaux peuvent être observées en même temps) que l'indialite est légèrement enrichie en fer par rapport à la glaçure. Des inclusions enrichies en aluminium, fer et magnésium ont été détectées à l'intérieur des cristaux d'indialite de Fuj1-CP-C3 et Jish1-CP-C4. Elles ont été identifiées comme des spinelles par TKD et sont discutées dans le paragraphe suivant dédié aux spinelles et à la mullite. De plus, des petits cristaux enrichis en fer ont été observés autour des cristaux d'indalite de Fuj1-CP-C2.

Les ratios moyens (et écarts-types indiqués entre parenthèses¹⁹) Fe/Mg, Al/Si et (Fe+Mg)/Al mesurés sur ces lames par STEM-EDS et sur les cristaux dans le bulk par SEM-EDS ont été calculés pour comparer de manière plus quantitative la composition des cristaux d'indialite entre les échantillons. Ils sont présentés dans le Tableau 15.

Échantillon	Fe/Mg	Al/Si	(Fe+Mg)/Al
Fuj1-CP-C2 (SEM)	0,29 (0,07)	0,7 (0,1)	0,54 (0,01)
Fuj1-CP-C2 (STEM)	0,257 (0,003)	0,83 (0,02)	0,51 (0,03)
Fuj1-CP-C3 (SEM)	0,13 (0,01)	0,8 (0,1)	0,51 (0,02)
Fuj1-CP-C3 (STEM)	0,113 (0,004)	0,825 (0,004)	0,54 (0,02)
Fuj1-CP-C4 (SEM)	0,24 (0,04)	0,56 (0,5)	0,49 (0,03)
Fuj1-CP-C4 (STEM)	0,18	0,86	0,53
Jish1-CP-C4 (SEM)	0,43 (0,05)	0,74 (0,03)	0,48 (0,02)
Jish1-CP-C4 (STEM)	0,278 (0,007)	0,839 (0,006)	0,49 (0,01)

Tableau 15 : Ratios élémentaires moyens mesurés sur les cristaux d'indialite

19- Aucun écart-type n'est présenté pour Fuj1C4 car le cristal étant très homogène, une seule zone de mesure a été effectuée pour déterminer sa composition.

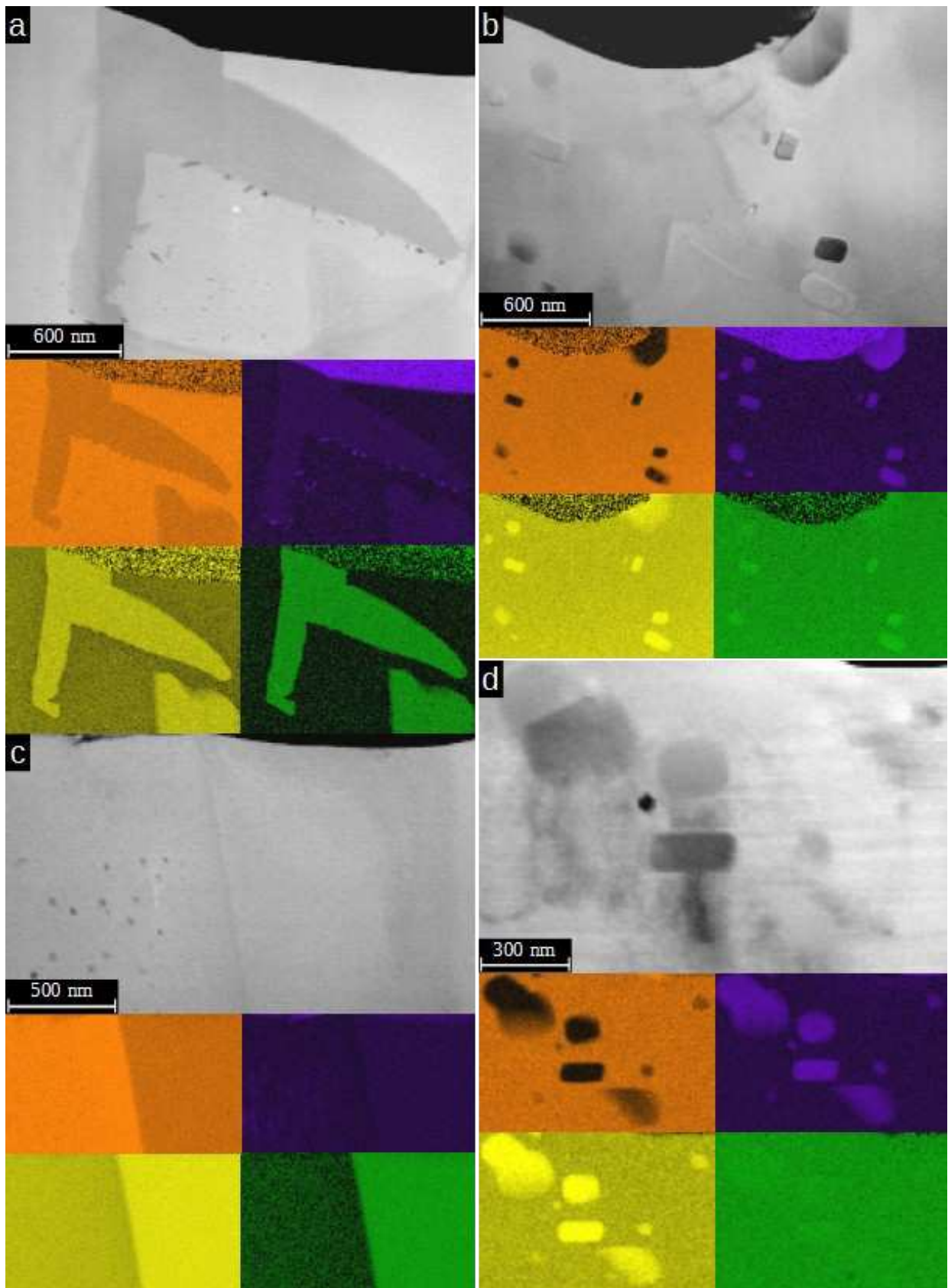


Figure 78 : Images STEM (200 kV, grossissement $\times 100000$) des lames effectuées sur les cristaux d'indialite de Fuj1-CP-C2 (a), Fuj1-CP-C3 (b), Fuj1-CP-C4 (c) et Jish1-CP-C4 (d) et cartographies EDS associées (Si (orange), Al (jaune), Fe (violet) et Mg (vert))

Quelques différences peuvent être observées entre les ratios mesurés par SEM-EDS et par STEM-EDS, en particulier sur les ratios Al/Si systématiquement plus faibles avec les mesures SEM-EDS. Ceci est sans doute dû à la poire d'interaction importante en SEM qui peut englober dans la zone analysée de la glaçure plus riche en silicium que les cristaux. Une différence notable est également visible sur le ratio Fe/Mg de Jish1-CP-C4, qui peut-être due à la présence des inclusions enrichies en fer observées par STEM qui sont compris dans la zone analysée par SEM-EDS. Cette différence ne semble cependant pas affecter la quantité totale de divalent, puisque les ratios (Fe+Mg)/Al sont du même ordre avec ces deux techniques.

La formule chimique théorique de l'indialite étant $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$, les rapports Al/Si et (Fe+Mg)/Al valent en théorie respectivement 0,8 et 0,5. Ces rapports correspondent bien à ceux mesurés dans les cristaux, ce qui suggère au vu du ratio (Fe+Mg)/Al que le fer est principalement sous forme ferreuse dans les cristaux. Il substitue ainsi vraisemblablement le magnésium et non l'aluminium. En comparant les ratios Fe/Mg de Fuj1-CP-C2 et Fuj1-CP-C3, il semble qu'une atmosphère plus oxydante prévienne l'incorporation du fer dans cette espèce, ce qui est cohérent avec le fait que cet élément y est présent sous la forme ferreuse. De plus, il semble que la matière première influence également ce ratio, car la terre Jish1 contient davantage d'oxyde de fer et moins d'oxyde de magnésium que Fuj1 et le ratio Fe/Mg de l'indialite de Jish1-CP-C4 est plus important que celui de Fuj1-CP-C4.

4) *Spinelle, nanoparticules et mullite*

La préparation des différentes lames minces présentées dans les deux paragraphes précédents pour étudier l'indialite et la phase ϵ -Fe₂O₃ a également été l'occasion de vérifier la nature chimique des inclusions et la composition de la mullite présentes sur certaines de ces lames. De plus, la lame de Fuj1-CP-C2 contenait sur le côté quelques nanoparticules avoisinant les cristaux d'indialite qui ont été également étudiées par STEM-EDS (cf. Figure 79).

Les nanoparticules autour des cristaux d'indialite semblent avoir des compositions assez variées, comme le suggèrent les différents contrastes sur les cartographies du magnésium et du fer. D'autre part, les inclusions dans l'indialite ont été identifiées comme des spinelles par des pointés ponctuels TKD sur la lame de Jish1-C4, avec des orientations qui semblent aléatoires. Malheureusement, à cause des problèmes expérimentaux rencontrés avec le TKD sur cette série d'échantillons et de contraintes temporelles, les autres lames n'ont pas pu être caractérisées structurellement.

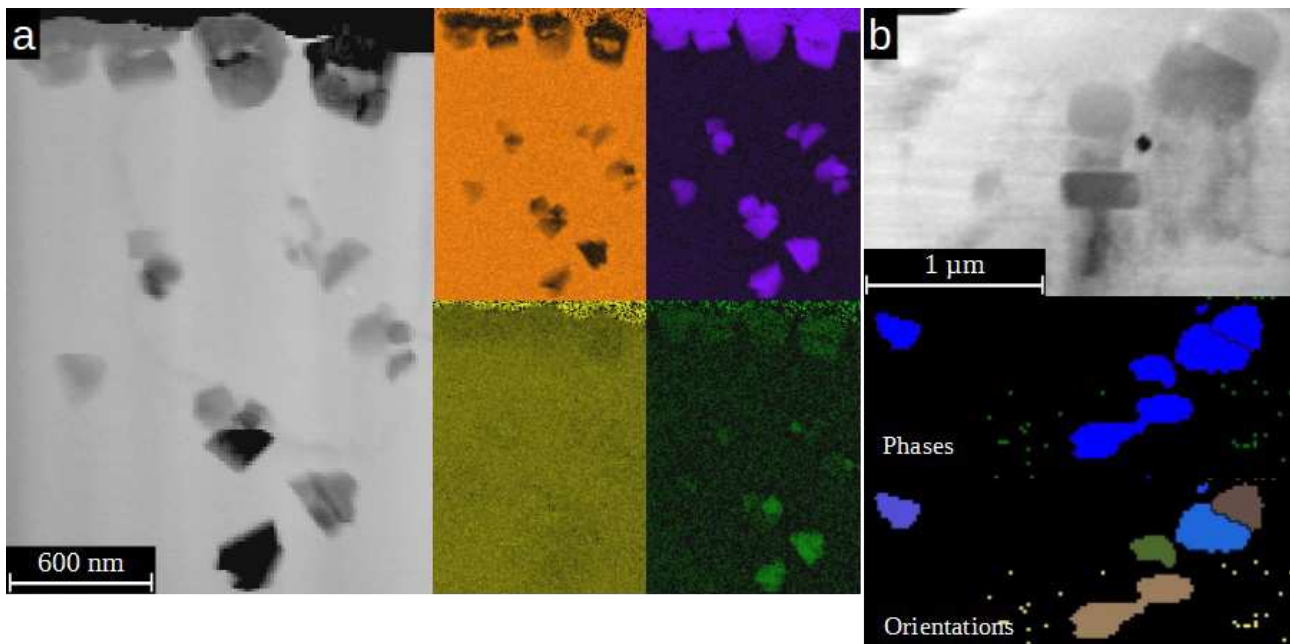


Figure 79 : Images STEM (200 kV, grossissements $\times 70000$ et $\times 100000$) de la lame avec du spinelle hors des cristaux d'indialite de Fuj1-CP-C2 (a) et cartographies EDS associées (Si (orange), Al (jaune), Fe (violet) Mg (vert)) et de la lame avec des cristaux de spinelle dans l'indialite de Jish1-CP-C4 et cartographies TKD de phase (spinel en bleu et indialite en vert) et d'orientation en angle d'Euler associées

Pour documenter plus en détail la nature de ces particules et inclusions, différents ratios élémentaires ont été calculés à partir des mesures effectuées par STEM-EDS. Ces ratios moyens (et écarts-types) sont présentés dans le Tableau 16.

Échantillon	Fe/Mg	Mg/Al	Fe/Al	(Fe+Mg)/Al
Jish1-CP-C4 (indialite)	0,9 (0,2)	0,25 (0,01)	0,23 (0,05)	0,47 (0,05)
Fuj1-CP-C3 (indialite)	0,7 (0,4)	0,41 (0,04)	0,3 (0,2)	0,7 (0,1)
Fuj1-CP-C2 (surface)	21,0 (4,9)	0,35 (0,09)	7,1 (0,6)	7,5 (0,6)
Fuj1-CP-C2 (profondeur type 1)	5,0 (0,1)	1,07 (0,08)	5,4 (0,3)	6,5 (0,3)
Fuj1-CP-C2 (profondeur type 2)	15,3 (1,7)	0,21 (0,02)	3,2 (0,6)	3,4 (0,6)

Tableau 16 : Ratios élémentaires moyens mesurés sur les différents spinelles

En considérant que ces spinelles sont de formule chimique $(\text{Mg}, \text{Fe}^{\text{II}})(\text{Al}, \text{Fe}^{\text{III}})_2\text{O}_4$, il apparaît que ceux en inclusion dans l'indialite sont assez proches de solutions solides $\text{FeAl}_2\text{O}_4\text{-MgAl}_2\text{O}_4$, avec une hercynite néanmoins un peu enrichie en fer pour ceux de Fuj1-CP-C3 puisque le ratio $(\text{Fe}+\text{Mg})/\text{Al}$ est légèrement supérieur à 0,5. La présence d'inclusions de spinelle dans l'indialite n'est pas très surprenante, puisque plusieurs travaux ont montré un lien entre ces deux phases, en proposant que la cristallisation de l'indialite s'effectue en consommant du spinelle [227,228] et plus récemment que la réaction inverse est possible [229]. Ici, au vu de la morphologie des cristaux, il semblerait plutôt que l'indialite se décompose en spinelle.

Pour les particules en dehors des cristaux d'indialite, trois compositions différentes ont été mesurées. Les particules de surface sont riches en fer, légèrement substituées par le magnésium et l'aluminium. Leur caractérisation structurale n'ayant pas pu être effectuée, il peut s'agir d'hématite,

de phase ϵ -Fe₂O₃ ou de spinelles riches en fer. Les particules plus en profondeur sont quant à elles davantage enrichies en magnésium et en aluminium avec deux taux de substitution récurrents, suggérant qu'il s'agit probablement de deux types de spinelle. Les deux compositions détectées sont proches de (Mg_{0,4},Fe^{II}_{0,6})(Al_{0,4},Fe^{III}_{1,6})O₄ et de (Mg_{0,1},Fe^{II}_{0,9})(Al_{0,7},Fe^{III}_{1,4})O₄ respectivement. Le regroupement de cristaux de composition significativement différentes dans une zone aussi réduite (à peine quelques microns carrés) suggère que leur composition n'est pas indicatrice de paramètres environnementaux, mais dépend principalement de la chimie très locale qui permet leur cristallisation.

D'autre part, la lame réalisée sur Jish1-CP-C3 a permis de vérifier la composition de la mullite par STEM-EDS qui sert de support à la phase ϵ -Fe₂O₃ dans la glaçure. Les analyses ont confirmé la présence de fer dans les zones associées aux cristaux de mullite, avec un ratio Fe/O de l'ordre de 4,3 %, avec un écart-type de 0,4 %. Les ratios Al/Si et (Al+Fe)/Si ont été respectivement déterminés à 2,4 et 2,6 (avec tous deux un écart-type de 0,2), ce qui correspond à un ratio (Al,Fe)₂O₃:SiO₂ légèrement inférieur à 3:2, qui correspond pourtant à la composition documentée la plus chargée en silicium de la mullite [188]. Ce léger excès provient probablement de la glaçure, qui est plus chargée en silicium et moins en aluminium et fer que la mullite. La cartographie TKD effectuée sur cette lame a confirmé l'identification des phases, mais la qualité des données relativement mauvaise à cause des problèmes expérimentaux décrits précédemment a prévenu l'étude des possibilités d'épitaxie.

5) Cristaux géométriques riches en fer

Les cristaux de forme géométrique réfléchissant la lumière par microscopie optique constituent le dernier point significatif et commun à de nombreux échantillons ayant subi les cycles de la série CP. Les analyses par spectroscopie Raman sur ces différents cristaux ont révélé une grande diversité d'espèces, avec des spectres le plus souvent caractéristiques de l'hématite, mais aussi de la phase ϵ -Fe₂O₃ ou de spinelles dans les échantillons soumis aux cycles CP-C2 à C4. De plus, les spectres de l'hématite enregistrés sur ces cristaux des différents échantillons présentent un pic large d'intensité élevé par rapport au spectre de l'hématite standard autour de 670 à 680 cm⁻¹. Ce pic est également souvent présent dans les hématites formées à partir d'argiles chauffées et a été interprété comme dû à des substitutions par le titane notamment [230]. Ce pic correspond typiquement aussi à la raie principale de plusieurs spinelles riches en fer (cf. Figure 80).

L'imagerie SEM effectuée a révélé des différences de contraste importantes au sein des cristaux, particulièrement ceux des échantillons soumis au cycle CP-C1 (cf. Figure 80-a et b). Au vu de leurs morphologies, ces contrastes sont sans doute liés à une variation chimique. Ils sont moins évidents sur les échantillons chauffés avec d'autres cycles thermiques, voire absents comme sur Jish1-CP-C2 où le contraste semble exclusivement topologique (cf. Figure 80-d).

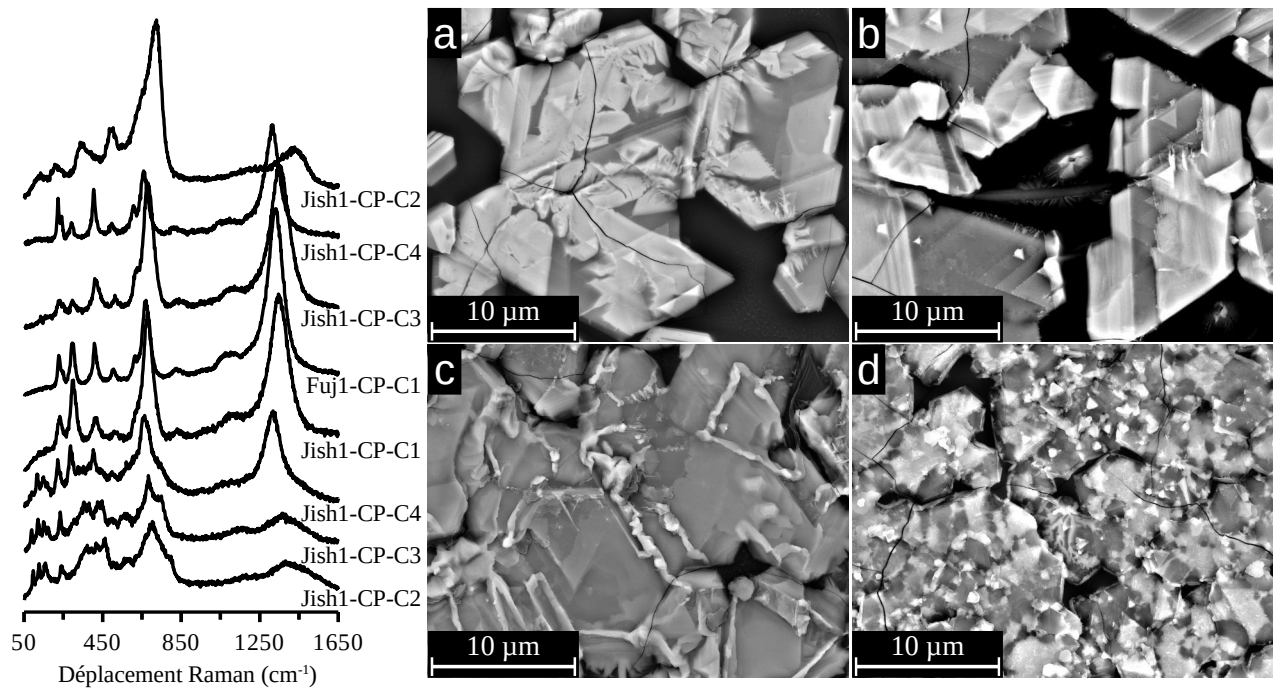


Figure 80 : Spectres Raman mesurés sur différents cristaux géométriques de la série Jish1-CP et images SEM (BSE, 18 kV, grossissement x5000) de ces cristaux sur Fuj1-CP-C1 (a), Jish1-CP-C1 (b), Jish1-CP-C2 (c) et Jish1-CP-C4 (d)

Pour investiguer plus en détail ce phénomène, la composition de divers cristaux a été mesurée par SEM-EDS. Les analyses ont révélé qu'il s'agit d'oxydes principalement de fer, avec pour certains des taux de substitutions très importants par le magnésium et l'aluminium, ainsi que des quantités plus mineures de chrome, de titane et de nickel. Malgré les poires d'interactions relativement grandes dans les conditions d'analyses utilisées (18 kV), des différences notables ont été observées, selon les zones de contrastes différents pointées au sein de mêmes cristaux (cf. Figure 81).

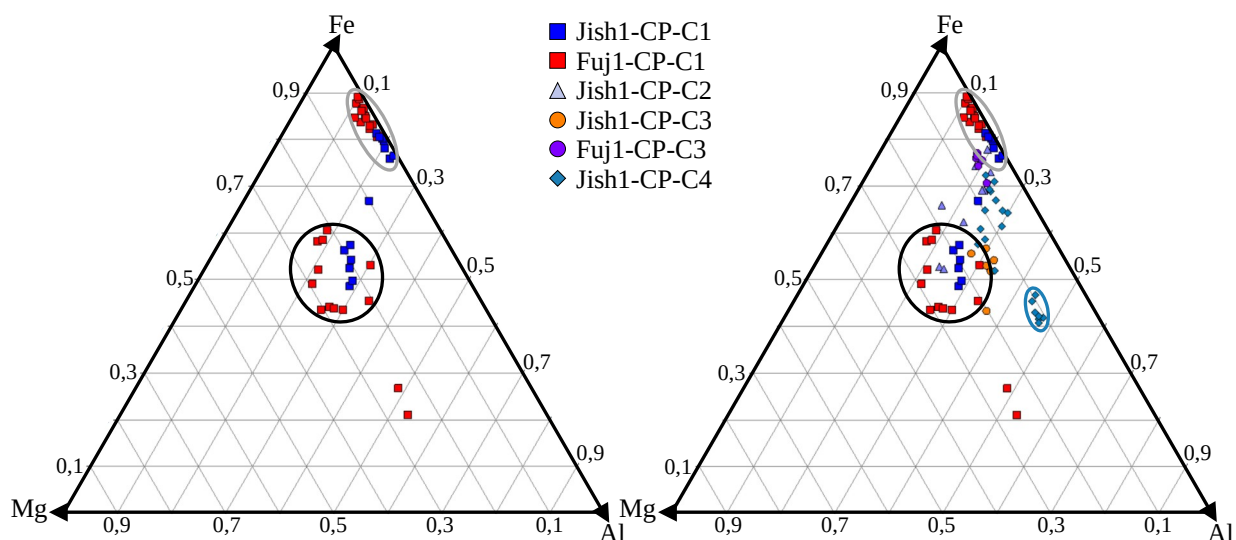


Figure 81 : Ternaires Fe-Al-Mg des compositions mesurées sur les cristaux de Jish1-CP-C1 et Fuj1-CP-C1 uniquement (gauche) et de tous les échantillons des séries Fuj1-CP et Jish1-CP possédant ces structures (droite)

Le diagramme ternaire Fe-Al-Mg dans lequel sont positionnés les points associés aux échantillons ayant subi le cycle CP-C1 illustre parfaitement les différences de composition entre les zones de différents contrastes dans les cristaux (cf. Figure 81-gauche). En effet, tous les points associés aux zones qui apparaissent plus claires sont situés dans l'ellipse grise très proche du sommet du fer et possèdent des ratios Mg/Fe et Al/Fe valant 0,019 avec un écart-type de 0,009 et 0,19 avec un écart-type de 0,06 respectivement. Au contraire, ceux associés aux zones plus foncées sont situés dans l'ellipse noire plus au centrée du diagramme et possèdent des ratios Mg/Fe et Al/Fe valant tous les deux 0,5 avec un écart-type de 0,1 (les points hors des ellipses n'ont pas été pris en compte dans ces moyennes). Ces différences de composition suggèrent que ces cristaux sont un mélange d'hématite substituée à l'aluminium et de spinelle alumino-magnésien substitué au fer. Cette hypothèse semble renforcée par les deux points isolés les plus riches en aluminium et magnésium qui présentent un ratio Mg/Al très proche de 0,5 (respectivement égal à 0,51 et 0,48), typique du spinelle $MgAl_2O_4$. Il s'agit probablement de pointés pour lesquels la poire d'interaction²⁰ comprenait moins de la phase riche en fer que les autres pointés.

L'ajout dans ce diagramme des points associés aux échantillons soumis aux cycles thermiques de durée plus réduite (CP-C2 à C4) comble l'espace entre les deux groupes définis par les cuissons du cycle CP-C1 (cf. Figure 81). Ceci suggère que ces composés cristallisent d'abord comme une seule espèce de composition intermédiaire qui subit ensuite une démixtion au cours du refroidissement s'il est suffisamment lent pour permettre sa ségrégation en deux phases. Ceci expliquerait également pourquoi les cristaux de cette morphologie ont des différences de contraste généralement moins flagrantes sur les échantillons des cycles CP-C2 à C4 que ceux du cycle CP-C1. L'espèce de composition intermédiaire est donc vraisemblablement métastable à température ambiante. Un groupe isolé semble également se définir sur Jish1-CP-C4 (ellipse bleue), qui se caractérise par des cristaux avec des ratios Mg/Fe et Al/Fe valant 0,26 avec un écart-type de 0,02 et 1,08 avec un écart-type de 0,08 respectivement, peut-être à cause de la présence d'oxydes mixtes de fer et d'aluminium, montrant la complexité des possibilités de démixtion ces systèmes.

6) Bilan

La surface des échantillons ayant subi les cycles thermiques CP-C1 à CP-C4 présente une grande diversité de cristaux, pour lesquelles l'atmosphère et la durée de cuisson ont une influence variable. Certaines phases sont peu affectées, comme le zircon ou le quartz qui proviennent directement de la matière première ou la cristobalite qui se forme au cours de la cuisson. Ce n'est par contre pas le cas des autres phases qui se forment au cours de la cuisson, pour lesquelles l'atmosphère et la durée semblent jouer un rôle important sur leur formation et leur composition.

Tout d'abord la mullite qui cristallise en surface des échantillons se forme davantage au cours des cycles de durées plus courtes. De plus, son absence sur les échantillons fabriqués à partir de la terre Fuj2 suggère qu'une composition très riche en calcium prévient sa formation. L'environnement chimique riche en fer favorisant l'incorporation de cet élément dans sa structure,

20- La poire est typiquement de l'ordre de 1 μm de diamètre surfacique et 2 μm de profondeur dans l'hématite et 1,5 μm de diamètre surfacique et 3 μm de profondeur dans le spinelle d'après les simulations à la tension utilisée.

l'atmosphère joue également un rôle important dans sa cristallisation, avec une croissance facilitée dans des conditions plus oxydantes.

L'indialite observée sur tous les échantillons fabriqués à partir de la matière Fuj1 et sur l'échantillon Jish1-C4 semble, comme la mullite, ne pas cristalliser dans les matières premières très riches en calcium. Sa présence uniquement sur Jish1C4 suggère que l'atmosphère joue probablement un rôle dans sa cristallisation, car elle incorpore dans sa structure des ions ferreux dont la présence est favorisée par une atmosphère plus réductrice.

À l'intérieur des cristaux d'indialite, des spinelles riches en magnésium, aluminium et fer ont été observés en inclusion, souvent associées à la présence de trous au centre des cristaux d'indialite. Leur présence est peut-être due à la décomposition de ces cristaux. Des spinelles ont également été observés en dehors de l'indialite. La composition de ces derniers est très variable au sein d'un même échantillon et ils ont été observés sur plusieurs échantillons sans tendance particulière, suggérant ainsi que leur cristallisation dépend de paramètres chimiques locaux plutôt que de paramètres environnementaux.

Des compositions typiques de spinelle ont également été occasionnellement mesurées dans des cristaux géométriques identifiés parfois comme de la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, rarement comme du spinelle et le plus souvent comme de l'hématite avec un pic intense entre 670 et 680 cm^{-1} par spectroscopie Raman. L'imagerie et les analyses par SEM-EDS de ces cristaux ont révélé des différences de contrastes chimiques en leur sein, particulièrement visibles sur les échantillons chauffés plus longtemps. Ces zones de contrastes différents sont associés à des compositions soit riches en fer, soit riches en magnésium et aluminium, suggérant qu'un composé intermédiaire entre des spinelles et des oxydes de fer se forme et peut se ségréger si le refroidissement est suffisamment lent.

Enfin, pour les cycles thermiques de durée plus courte, des oxydes de fer dendritiques ont été observés. Principalement identifiées comme de la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, ces dendrites sont relativement petites et de taille homogène, mais peuvent croître à des tailles bien plus importantes lorsqu'elles sont supportées par d'autres phases comme de la mullite, du zircon, des nanoparticules de composition diverse ou encore des pollutions de baddeleyite introduites par les pièges à oxygènes utilisés dans certains cycles. L'étude de la composition des dendrites de phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ a révélé que la composition de la matière première, l'atmosphère de cuisson et la position des dendrites par rapport à la surface ont probablement une influence sur les taux de substitutions. De plus, la variabilité des taux de substitution a un impact sur la position des raies Raman de faible déplacement.

B – Influence de la vitesse de refroidissement, de la composition de la matière première et de la température maximale atteinte sur la surface de la glaçure

Cette partie présente les analyses des échantillons chauffés de matière première ZJ-raw, préparée à partir de Jish1 par l'entreprise Yaozhou Kiln Lijia Porcelain Workshop Co. LTD, utilisée pure ou mélangée avec 5 %w de carbonate de calcium (CaCO_3) et soumis aux cycles thermiques CEMES-C1 à CEMES-C7. Ces cycles ont tous été effectués sous atmosphère ambiante. Les cycles CEMES-C1, CEMES-C2 et CEMES-C3 ont tous pour température maximale 1320°C et pour seule

différence leur durée de refroidissement, fixée respectivement à 6 heures, 9 heures et 12 heures. CEMES-C4, CEMES-C5 et CEMES-C6 ont quant à eux tous une durée de refroidissement et une vitesse de chauffe similaire à CEMES-C1 mais une température maximale atteinte de respectivement 1220°C, 1270°C et 1370°C. Enfin, CEMES-C7 a exactement les mêmes caractéristiques que CEMES-C1, il a été effectué pour chauffer les échantillons élaborés avec la pâte préalablement dégourdie.

1) Observations optiques

L'influence de la teneur en calcium de la matière est évidente par simple comparaison optique des échantillons fabriqués avec ZJ-raw pure et mélangée avec du carbonate de calcium (cf. Figure 82).

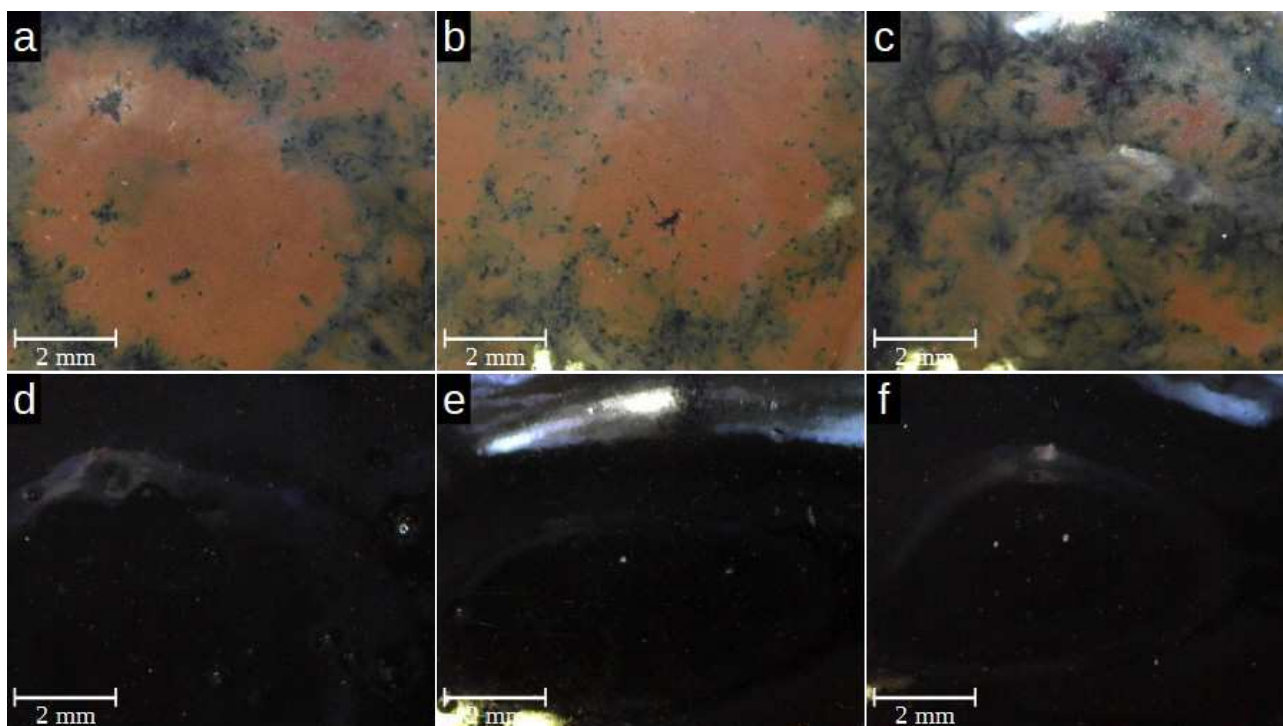


Figure 82 : Images optiques (grossissement x25) des échantillons Raw-CEMES-C1 (a), Raw-CEMES-C3 (b), Raw-CEMES-C6 (c), Ca-CEMES-C1 (d), Ca-CEMES-C3 (e) et Ca-CEMES-C6 (f)

En effet, comme le montrent les exemples sélectionnés, les échantillons fabriqués à partir de matière première enrichie en calcium présentent des glaçures plutôt homogènes de couleur noire et fortement vitrifiées, alors que celles fabriquées avec la matière sans ajout ont de nombreuses zones brunes, de la couleur « sauce » typique des productions Sòng. Cette différence flagrante montre que le calcium a une forte influence sur l'aspect global de la glaçure, confirmant dans le même temps les observations effectuées sur les échantillons fabriqués avec la terre Fuj2 plus riche en calcium et discutées dans la partie précédente. Cependant, contrairement aux échantillons fabriqués avec Fuj2, aucune structure dendritique n'a été observée sur ces glaçures.

La température maximale atteinte au cours des cycles thermiques est également un facteur décisif sur l'aspect global des glaçures fabriquées avec ZJ-raw (cf. Figure 83).

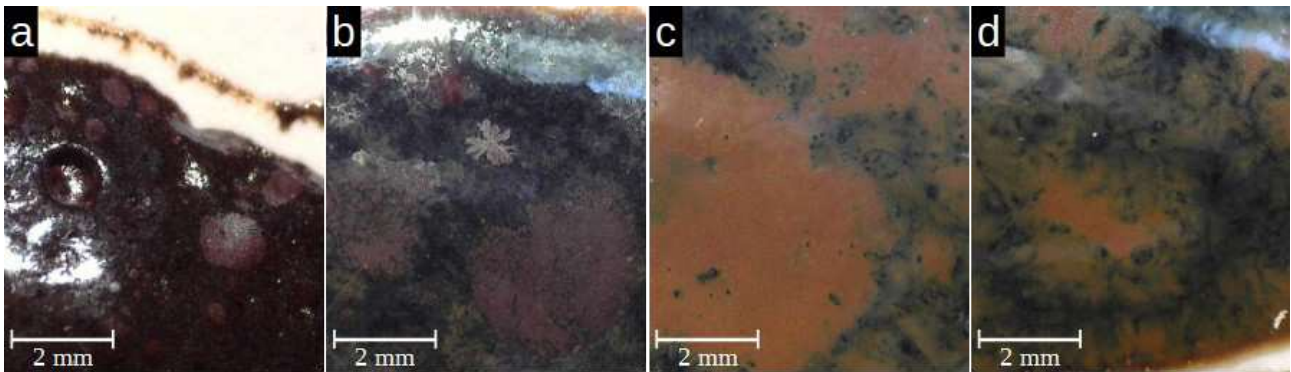


Figure 83 : Images optiques (grossissement x25) des échantillons Raw-CEMES-C4 (a), Raw-CEMES-C5 (b), Raw-CEMES-C1 (c) et Raw-CEMES-C6 (d)

En effet l'échantillon Raw-CEMES-C4 (cuit à 1220°C) (cf. Figure 83-a) présente un aspect clairement sous-cuit, avec des marques nettes de retrait en bordure de glaçure et une surface accidentée présentant des bulles en surface qui ne se sont pas résorbées, caractéristiques de glaçures qui sont restées très visqueuses au cours de la cuisson. Il possède également quelques taches rouges. L'échantillon Ca-CEMES-C4 est assez similaire, avec des marques de sous-cuisson identiques, mais il ne possède cependant pas les taches rouges.

Les échantillons chauffés à plus haute température ne possèdent pas de tels indices de sous-cuisson. Ceux fabriqués avec la matière enrichie en calcium présentent tous un aspect comparable, avec une glaçure sombre et bien vitrifiée comme discuté précédemment. Au contraire, ceux fabriqués avec ZJ-raw sont différents : Raw-CEMES-C5 (cuit à 1270°C) présente des taches relativement circulaires aux bordures irrégulières dont la couleur n'est pas le brun typique des glaçures « sauces » et la forme rappelle celles des glaçures « taches de rouille » produites par les fours de Línfén (Shānxī) [231] (cf. Figure 83-b). Raw-CEMES-C1 et Raw-CEMES-C6 (cuits à 1320°C et 1370°C respectivement) possèdent quant à eux des zones de cette couleur caractéristique (cf. Figure 83-c et d). Ces dernières semblent plus larges sur Raw-CEMES-C1 qui a été cuit à plus basse température que sur Raw-CEMES-C6, où elles semblent avoir coulé davantage. Cette différence est cohérente avec le fait qu'une glaçure chauffée à plus haute température est moins visqueuse. La température du cycle thermique a d'ailleurs été proposée pour expliquer la différence entre les motifs « fourrures de lièvre » et « taches d'huile » [99], et peut sembler plausible au regard de ces échantillons malgré le fait que Raw-CEMES-C5 ne soit pas une glaçure « taches d'huile » typique.

Enfin, l'aspect optique des échantillons dont le refroidissement de consigne était différent est relativement comparable (cf. Figure 84).

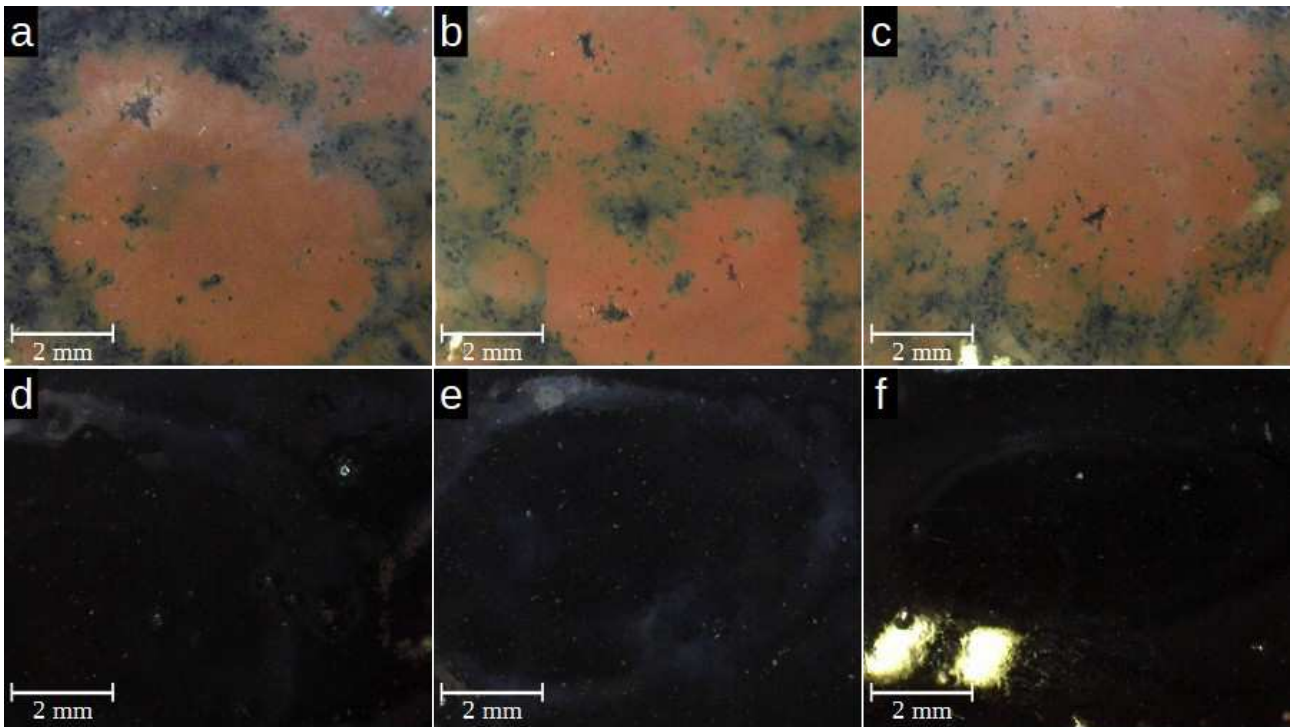


Figure 84 : Images optiques (grossissement x25) des échantillons Raw-CEMES-C1 (a), Raw-CEMES-C2 (b), Raw-CEMES-C3 (c), Ca-CEMES-C1 (d), Ca-CEMES-C2 (e) et Ca-CEMES-C3 (f)

En effet, les échantillons fabriqués avec ZJ-Raw pure possèdent tous de larges zones brun « sauce » séparées de zones où la glaçure est plus sombre. Occasionnellement, des défauts de plusieurs dizaines de microns peuvent être observés au milieu des zones brunes, apparaissant comme des taches noires aux bordures irrégulières mais nettes. Les échantillons fabriqués avec ZJ-Raw enrichie en calcium sont également très comparables avec leur glaçure sombre et homogène. L'absence d'influence évidente de ce paramètre est surprenante, puisque les dendrites cristallisent lors du refroidissement et qu'il a été montré que cette étape peut faire varier fortement l'aspect de glaçures riches en fer [83]. L'absence d'influence optiquement visible suggère que la durée de refroidissement n'a pas d'influence sur l'échelle de durée testée (entre six et douze heures). Des durées beaucoup plus longues (un ou plusieurs jours) pourraient peut-être avoir une influence optique sur l'aspect de la glaçure.

2) Caractérisation par spectroscopie Raman

Les surfaces des échantillons soumis aux cycles CEMES-C1, CEMES-C3, CEMES-C5 et CEMES-C6 ont été caractérisées par spectroscopie Raman (cf. Figure 85).

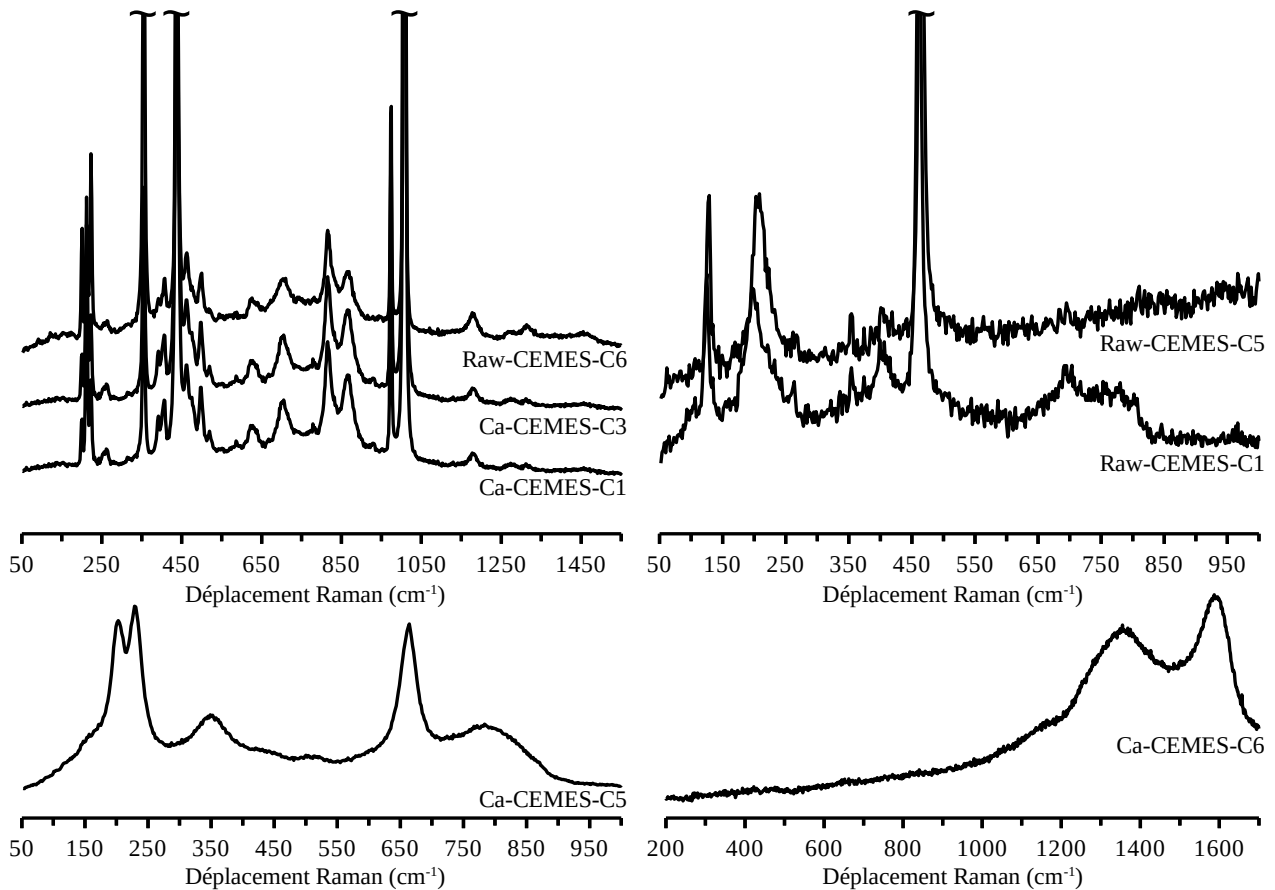


Figure 85 : Spectres Ramans de zircons (haut gauche), quartz (haut droite), pseudobrookite (bas gauche) et carbone (bas droite) enregistrés sur les échantillons soumis aux cycles de la série CEMES

Comme pour la plupart des surfaces analysées jusqu'à présent, du zircon a été trouvé sur ces échantillons, provenant de la matière première. Du quartz, provenant aussi de la matière première, a été trouvé sur Raw-CEMES-C1 et Raw-CEMES-C5. De la pseudobrookite a été observée sur Ca-CEMES-C5, sans doute issue de la réaction d'un cristal d'anatase avec la matrice vitreuse. De plus, une trace de matière organique carbonisée a été observée dans la glaçure de Raw-CEMES-C6, sans doute provenant aussi d'une transformation de la matière première.

Pour ce qui est des oxydes de fer, de la phase ϵ -Fe₂O₃ et de l'hématite ont été souvent trouvées en proportions variables sur ces échantillons (cf. Figure 86).

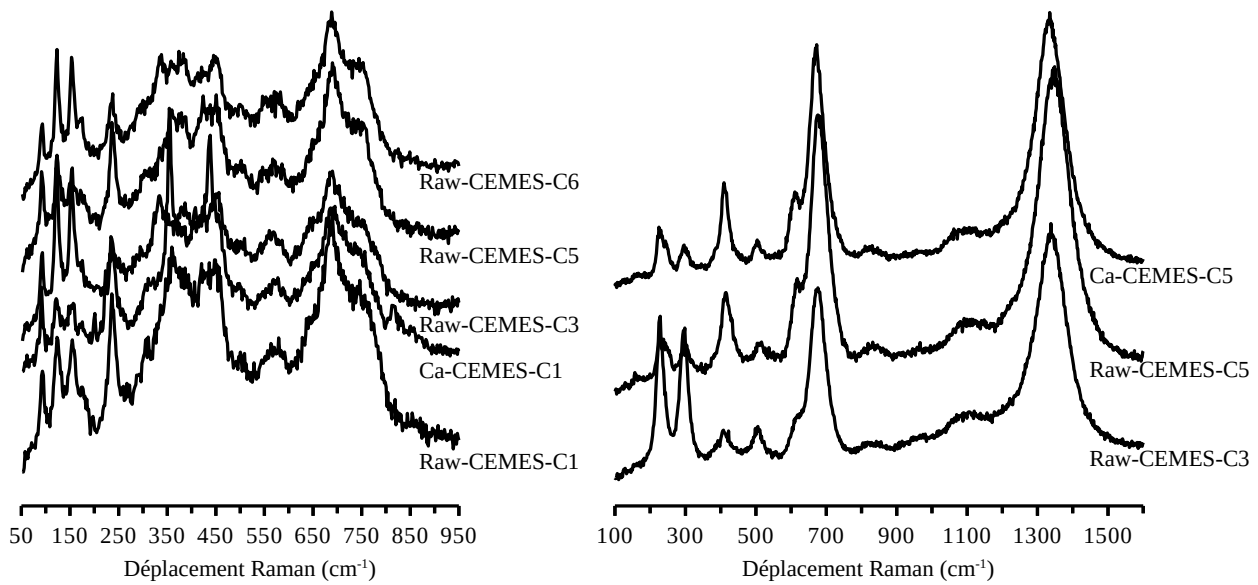


Figure 86 : Spectres Ramans de phase ϵ -Fe₂O₃ (gauche) et d'hématite (droite) enregistrés sur les échantillons soumis aux cycles de la série CEMES

Seule la phase ϵ -Fe₂O₃ a été identifiée sur les échantillons issus du cycle CEMES-C1, avec de très nombreux cristaux répartis sur la surface de Raw-CEMES-C1 alors que Ca-CEMES-C1 ne contenait que des dendrites très peu développées autour de cristaux de zircon. Raw-CEMES-C3, qui diffère de Raw-CEMES-C1 uniquement par sa durée de refroidissement de consigne deux fois plus longue, possède à sa surface à la fois de l'hématite et de la phase ϵ -Fe₂O₃. L'hématite semble correspondre aux dendrites les plus longues qui ne poussent pas sur un support, alors que la phase ϵ -Fe₂O₃ correspond aux petits cristaux homogènes sur les surfaces brunes ainsi qu'à de très longues dendrites croissant sur des cristaux de zircon. De telles différences suggèrent d'une part qu'un temps de refroidissement long favorise la croissance de cristaux d'hématite, de manière cohérente avec les conclusions tirées de la série d'échantillons cuits avec cycles CP, d'autre part que le zircon semble promouvoir principalement la croissance de la phase ϵ -Fe₂O₃ et non celle de l'hématite.

Ca-CEMES-C3 possède quant à lui de petites dendrites autour des cristaux de zircon similaires à celles de Ca-CEMES-C1, néanmoins leur taille est si faible qu'elles n'ont pas pu être caractérisées (seul le signal du zircon voisin a été détecté).

Les taches brunes de l'échantillon Raw-CEMES-C5, de manière très similaire à celui des fours de Línfén [231], sont constituées essentiellement de cristaux d'hématite, alors que les zones brunes de la glaçure autour des taches qui présentent de petits cristaux micrométriques présentent des spectres caractéristiques de la phase ϵ -Fe₂O₃. Comme ceux obtenus sur les cristaux géométriques des séries d'échantillons précédents, les spectres de l'hématite présentent un pic intense autour de 670 à 680 cm⁻¹, qui est sans doute dû au même phénomène. Un cristal globuleux d'hématite isolé a été observé sur Ca-CEMES-C5.

Sur Raw-CEMES-C6, des cristaux de phase ε -Fe₂O₃ uniquement ont été identifiés. Enfin, sur Ca-CEMES-C6, comme pour Ca-CEMES-C3, seules quelques petites dendrites croissant autour de cristaux de zircon et dont la taille est trop faible pour être la caractérisation ont été observées.

Les différentes phases observées sur les échantillons Raw-CEMES-C5, Raw-CEMES-C1 et Raw-CEMES-C6, dont la seule différence est la température maximale atteinte au cours de la cuisson (respectivement 1270° C, 1320°C et 1370°C) suggèrent que l'élévation de la température prévient la formation des taches brunes composées de nombreux cristaux d'hématite.

C – Influence de la vitesse de refroidissement, de la composition de la matière première et d'un dégraissage de la pâte sur l'interface entre la pâte et la glaçure

L'étude de l'interface entre la pâte et la glaçure des échantillons archéologiques de la série BG ayant révélé la présence occasionnelle d'une couche de cristaux d'anorthite (CaAl₂Si₂O₈), la série de cycles thermiques CEMES a été également l'occasion de vérifier la présence ou non de cette couche dans divers échantillons, afin de voir si sa présence est influencée par certains de ces paramètres.

1) Influence de la composition de la matière première

Pour vérifier l'influence de la composition, en particulier la quantité de calcium dans la matière première, les échantillons Raw-CEMES-C3 et Ca-CEMES-C3, qui ont subi le même cycle thermique et dont la seule différence est la composition de la glaçure crue ont été comparés (cf. Figure 87).

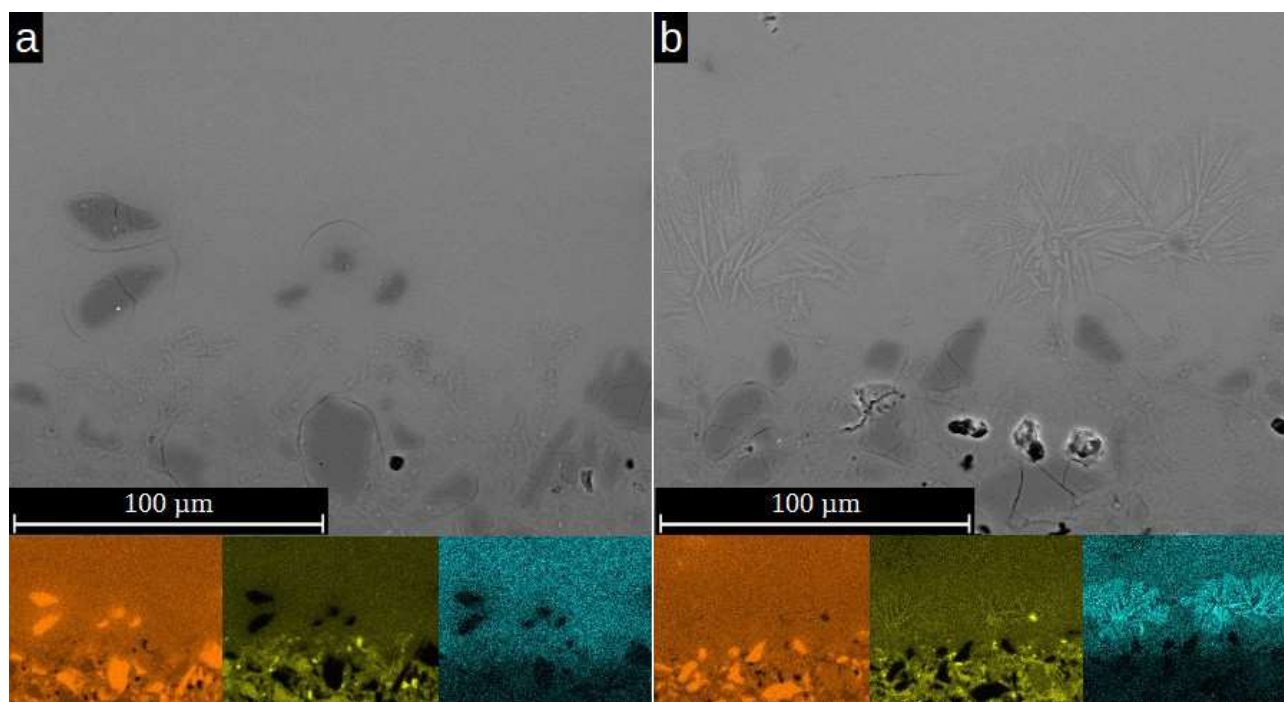


Figure 87 : Images SEM (BSE, 18 kV, grossissements x500) des interfaces entre la glaçure et la pâte de Raw-CEMES-C3 (a) et Ca-CEMES-C3 (b) et cartographies EDS associées (Si (orange), Al (jaune) et Ca (cyan))

Les images SEM et cartographies EDS révèlent de manière évidente l'existence de la couche enrichie en calcium pour Ca-CEMES-C3 alors que celle-ci est absente de Raw-CEMES-C3.

Au vu de leur composition (riche en Ca, Al et Si) et de leur morphologie identique à celle des cristaux observés sur les échantillons de la série BG, il s'agit d'anorthite. Son absence sur l'échantillon Raw-CEMES-C3 ayant une glaçure plus pauvre en calcium indique qu'un de taux de calcium élevé dans la glaçure favorise effectivement la formation de cette couche, comme il avait été présumé au regard de BG-03, qui présentait cette couche uniquement du côté de la glaçure dont le taux d'oxyde de calcium avait été mesuré à 6,7 % et non de celui où ce taux avait été mesuré à 4,9 %. La présence de cette couche sur BG-09 dont le taux d'oxyde de calcium avait été mesuré à 4,0 % suggérant que la quantité de calcium n'est pas le seul paramètre à prendre en compte, d'autres échantillons ont été comparés pour observer leur influence.

2) Influence de la vitesse de refroidissement

La comparaison des échantillons Ca-CEMES-C3 et Ca-CEMES-C7, dont le refroidissement de consigne est respectivement de 12 heures et 6 heures, permet de constater que ce paramètre a un léger impact sur la croissance des cristaux d'anorthite (cf. Figure 88).

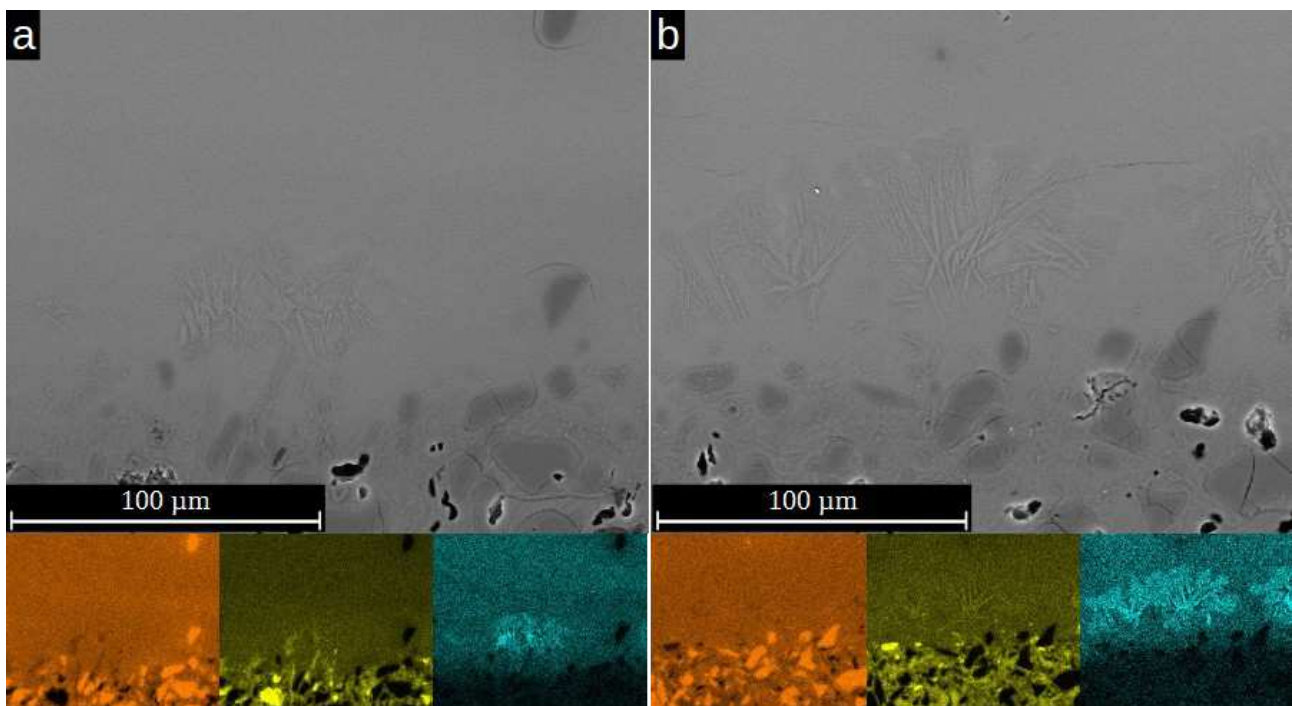


Figure 88 : Images SEM (BSE, 18 kV, grossissements x500) des interfaces entre la glaçure et la pâte de Raw-CEMES-C3 (a) et Ca-CEMES-C7 (b) et cartographies EDS associées (Si (orange), Al (jaune) et Ca (cyan))

En effet, les cristaux sont moins développés sur l'échantillon Ca-CEMES-C7 qui a refroidi de manière plus rapide. Cette différence semble cohérente, puisqu'un refroidissement plus lent favorise la mobilité des espèces chimiques qui peuvent ainsi contribuer davantage à la croissance. En outre, la couche d'anorthite de Ca-CEMES-C7 semble également un peu moins dense que celle de Ca-CEMES-C3, suggérant qu'un refroidissement plus lent permet de créer plus de centres de germination.

3) Influence du dégourdi de la pâte

Avant d'appliquer tout traitement de surface sur la pâte, il est aujourd'hui commun de faire une pré-cuisson de la pâte, qualifiée de cuisson de dégourdi [3,232]. Cette cuisson permet, dans le cas des porcelaines, de faciliter sa manipulation, sans pour autant vitrifier la pâte, ce qui rendrait plus difficile l'adhésion de la glaçure ou d'un décor peint. Cette pratique étant également utilisée par les artisans produisant les céramiques noires et brunes aujourd'hui [170], il est également plausible qu'elle ait été utilisée à l'époque des Sòng.

Pour vérifier d'un tel traitement sur le résultat final, des échantillons soumis au cycle thermique CEMES-C7 ont été préparés avec de la matière première enrichie en calcite appliquée sur des pâtes ayant subi un dégourdi, soit à 600°C pendant 10h, à 900°C pendant 3h ou à 900°C pendant 10h et ont été comparées avec Ca-CEMES-C7 dont la pâte n'a pas été préalablement dégourdie.

La comparaison de ces différents échantillons a révélé que ce traitement a une influence très importante sur la formation de l'anorthite à l'interface entre la pâte et la glaçure (cf. Figure 89).

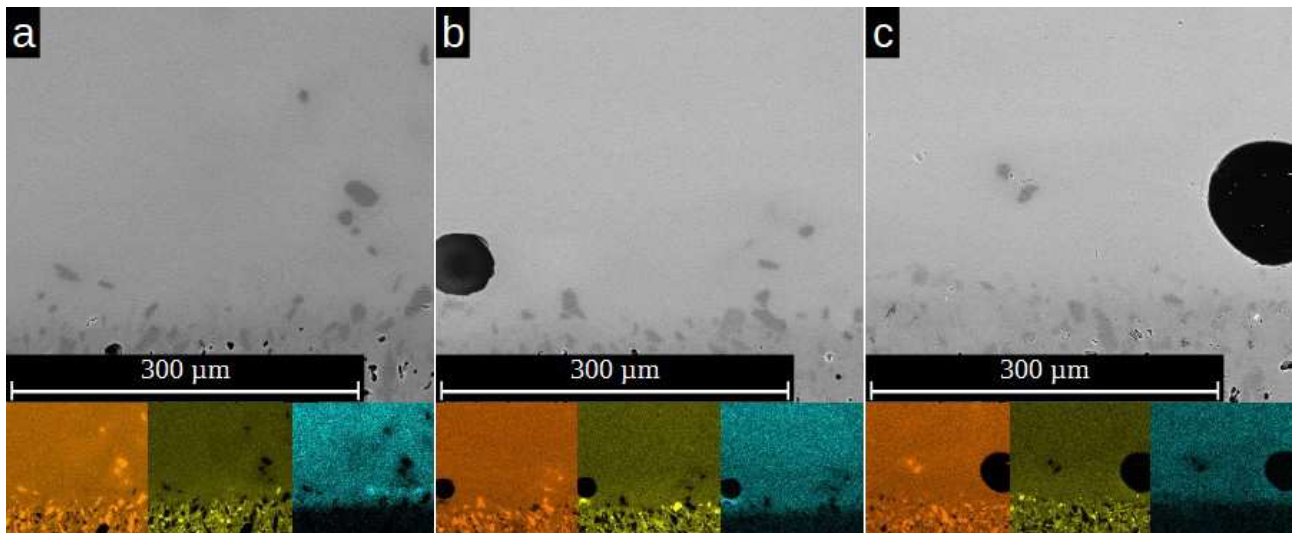


Figure 89 : Images SEM (BSE, 18 kV, grossissements x500) des interfaces entre la glaçure et la pâte de Ca-CEMES-C7 sur pâte non dégourdie (a), avec un dégourdi à 600°C pendant 10 heures (b) et avec un dégourdi à 900°C pendant 10 heures (c) et cartographies EDS élémentaires associées (Si (orange), Al (jaune) et Ca (cyan))

En effet, comme mentionné précédemment, l'échantillon à pâte non dégourdie présente plusieurs cristaux d'anorthite à son interface alors qu'une telle cristallisation est quasiment absente dans les échantillons pour lesquels la pâte a été dégourdie. Cette différence suggère que l'exécution d'un dégourdi prévient la formation de ces cristaux, probablement en rendant la pâte moins réactive vis-à-vis de la glaçure. En effet, ce traitement provoque traditionnellement la métakaolinisation [232], transformation intermédiaire du kaolin qui constitue la première étape de sa transformation en mullite [233–235]. Cette transformation permet de stabiliser l'aluminium présent dans la pâte qui ne peut ainsi plus diffuser dans la glaçure pour former les cristaux d'anorthite.

De rares cristaux d'anorthite isolés ont été néanmoins observés sur toutes les sections des échantillons ayant subi un dégourdi, cependant il n'y en a pas suffisamment pour dresser une corrélation entre la température ou la durée du dégourdi avec la quantité d'anorthite cristallisée.

4) Bilan

Cette série d'observations montre que l'apparition de la couche de cristaux d'anorthite entre la glaçure et la pâte dépend de plusieurs facteurs. L'augmentation de la quantité de calcium dans la glaçure favorise sa cristallisation, comme il est intuitivement attendu au vu de la formule chimique de l'anorthite. Un refroidissement plus lent favorise également la croissance des cristaux, probablement parce qu'il permet d'allonger le temps pendant lequel les espèces chimiques ont une mobilité importante. Enfin, effectuer un dégourdi de la pâte diminue fortement la formation d'anorthite à l'interface, potentiellement en stabilisant la surface de la pâte, la rendant moins réactive vis-à-vis de la glaçure lors de la seconde cuisson.

Même si les conditions réactionnelles aux interfaces de ces recreations sont un peu différentes de celles des échantillons archéologiques de Yàozhōu, en particulier car la pâte est plus pure et fine ici, elles peuvent suggérer des pistes d'interprétation pour expliquer la présence seulement occasionnelle de cette couche dans les échantillons anciens. Pour des échantillons dont les glaçures ont un taux d'oxyde de calcium similaire (autour de 4 %w), comme BG-07 et BG-09, mais dont un seul présente une couche d'anorthite à l'interface pâte/glaçure, il peut être envisagé qu'un dégourdi a été effectué, ce qui expliquerait la différence entre ces deux échantillons.

Il est également possible d'imaginer qu'une couche riche en calcium (à base de calcite ou gypse par exemple) ait été ajoutée à l'interface, soit pour fluidifier la glaçure en profondeur uniquement et favoriser la diffusion du fer vers la surface sans prévenir la précipitation de la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, soit comme un engobe moins coûteux que la kaolinite pure pour donner à la pâte un aspect plus blanc.

Conclusion et perspectives

1) Rappel des objectifs

Ce travail a pour objet d'étude les céramiques à glaçure noire et brune produites sous la dynastie Sòng dans divers fours de plusieurs provinces chinoises. Il s'inscrit dans une dynamique interdisciplinaire entre les sciences des matériaux et l'histoire de l'art, illustrée par les deux axes d'études principaux abordés : la microstructure de ces glaçures et l'étude de sa formation en détail, et l'étude de la nomenclature utilisée pour qualifier ces productions dans la littérature spécialisée.

Pour cela, un corpus d'échantillons varié a été rassemblé, associant des tessons archéologiques provenant de plusieurs sites différents (Huángpǔ et Yīngōu, associés aux fours de Yàozhōu (Shǎnxī) ; Dìngzhōu (Héběi) ; Lúhuāpíng et Dàlùhòmén, associés aux fours de Jiàn (Fújiàn) et Tiānmù (Zhèjiān)), des recreations modernes, des éprouvettes tests fabriquées en conditions artisanales, des matières premières chauffées en conditions de laboratoire et des objets issus de collections muséales. Ce corpus a été caractérisé à l'aide de plusieurs méthodes analytiques en fonction des contraintes liées à ces échantillons et de leur disponibilité, afin de documenter notamment le mécanisme de cristallisation des dendrites de phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, typiques de cette famille de glaçures, mais aussi la formation d'autres espèces cristallines. L'influence de quelques paramètres de cuisson pouvant avoir une incidence sur cette croissance était également recherchée.

En parallèle, la manière dont ont été désignées quelques centaines d'objets à glaçure noire et brune dans divers catalogues de collection, d'exposition, de vente ainsi que sur les sites des collections en ligne de grands musées et ouvrages généraux sur la céramique chinoise a été recensée et comparée aux expressions chinoises utilisées lorsque ces dernières ont pu être identifiées.

2) Principaux résultats

L'étude de la nomenclature utilisée pour qualifier les céramiques à glaçure noire et brune a été présentée dans le **Chapitre I**, après avoir replacé cette grande famille dans le contexte de l'histoire des céramiques foncées en Chine et le contexte historique global de la dynastie Sòng. Cette étude montre la diversité de ces glaçures, qui ont été réparties ici en trois classes : glaçures monochromes, à décors abstraits et à décors figuratifs. Si les glaçures monochromes semblent avoir été produites à travers toute la Chine, cette étude met en évidence que certains types de glaçures à motifs étaient principalement produites dans certains complexes de fours, comme les glaçures à mouchetures et à coulures qui étaient fabriquées en majorité dans les fours de Jiàn (Fújiàn), ou celles à décors réalisés avec la technique « paper-cut » dans les fours de Jízhōu (Jiāngxī). Elle montre également que les expressions imagées, comme « fourrure de lièvre » ou « goutte d'huile » sont issues d'expressions chinoises, même si certaines ont été légèrement modifiées, par exemple « fourrure de lièvre » dont l'expression chinoise d'origine se traduit littéralement par « poils de lapin ». Certaines expressions, comme « plume de perdrix », sont utilisées pour décrire des glaçures d'aspect différent dans la littérature anglaise et chinoise, illustrant leurs éventuelles réinterprétations. Enfin, pour certaines

glaçures, en particulier celles qui possèdent la couleur brun « sauce » caractéristique, elle montre que la multiplication du vocabulaire (« kaki », « rouille », « roux », « coloré au fer »...) est parfois due à des expressions chinoises, mais également à l'interprétation des auteurs.

La caractérisation des tessons archéologiques et des objets issus de collections muséales présentée dans le **Chapitre III** a permis de discuter la cohérence du corpus d'échantillons. Elle a aussi démontré que la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ se trouve principalement dans les zones brunes de la glaçure, alors qu'elle est quasiment absente des zones noires. Cette phase présente des substitutions cationiques au titane, au magnésium et à l'aluminium, ces dernières avec un taux très important, se rapprochant d'une solution solide entre $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ et l'oxyde mixte de même structure AlFeO_3 . Les dendrites ont une taille relativement homogène sur les zones brunes, mais croissent davantage autour de certains défauts, notamment des cristaux globuleux de zircon qui ont été observés sur la plupart des échantillons. Leur orientation par rapport à la surface est très similaire entre des échantillons de différentes provenances, suggérant des mécanismes de croissance identiques. De plus, les sections transverses ont révélé la présence non systématique de couches enrichies en calcium ou magnésium à l'interface de quelques tessons issus des productions du four de Huángpǔ (Yàozhōu). Ces enrichissements sont associés à la cristallisation d'anorthite ou d'indialite/cordiérite respectivement, les premiers ayant été documentés sur des échantillons de céladon mais pas de glaçure brune et le second pas signalé.

Les éprouvettes tests fabriquées en conditions artisanales ont permis de démontrer que la croissance de la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ a lieu au cours du refroidissement dès les hautes températures. L'éprouvette sortie à cette étape possédant plusieurs similarités avec les échantillons anciens, elle a servi de base pour établir les équations de cristallisation de la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ en prenant en compte les substitutions avec l'aluminium présentées dans le **Chapitre IV**. L'éprouvette sortie en fin de cuisson possède quelques différences avec les échantillons archéologiques, en particulier sur la composition de ces dendrites, qui est bien plus complexe que celle sortie du four juste avant, mêlant phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, hématite et spinelle, trois phases dont les possibilités d'épitaxie ont été démontrées. De plus, les glaçures de cette série possèdent toutes des cristaux d'indialite, dont la cristallisation a lieu pendant la montée en température d'après des suivis *in-operando* effectués. Enfin, l'observation des créations à glaçure noire à reflets bleus a démontré que ces glaçures ne possèdent pas de dendrite de phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ mais de magnétite (mêlées avec des cristaux d'hercynite). De plus, leur structure de surface tout à fait particulière cause vraisemblablement leurs reflets bleutés par interaction avec la lumière. Les plissures présentes sur plusieurs des surfaces sont probablement dues à un effet similaire au « bloom » qui peut être observé sur les verres flottés.

Les différences observées entre ces éprouvettes et les échantillons archéologiques suggèrent que les conditions de refroidissement étaient différentes entre ces deux groupes. Pour documenter ces différences, des chauffes de matières premières en conditions contrôlées ont été réalisées pour vérifier l'influence individuelle de certaines d'entre elles et ont été développées dans le **Chapitre V**. Elles ont montré que l'atmosphère favorise la croissance de certaines espèces au détriment d'autres, par exemple la mullite en surface croît davantage en conditions plutôt oxydantes alors que la cristallisation de l'indialite est favorisée par une atmosphère plus réductrice. Le temps total de cuisson affecte de manière significative la proportion entre la phase $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ et l'hématite en surface. La composition de la glaçure brute a également une influence assez forte sur le résultat final, les glaçures crues riches en calcite conduisent à des glaçures plus vitrifiées et contiennent des

dendrites de phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ bien développées uniquement au niveau de défauts locaux. Enfin, la température maximale de cuisson affecte de manière importante le résultat final. L'étude de la vitesse de refroidissement n'a pas montré de différence entre les échantillons refroidis entre des durées de six et douze heures. Pour ce qui est de l'interface pâte/glaçure, la composition de la glaçure et le temps de refroidissement ont une influence sur la formation de la couche d'anorthite qui s'y forme, de même qu'une éventuelle cuisson de dégourdi (pré-cuisson de la pâte).

3) Perspectives

Ce travail a permis de documenter de manière détaillée la cristallisation de la phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ dans les glaçures brunes anciennes, mais des questions à propos de la formation de cette phase restent en suspens.

En effet, la raison pour laquelle elle croit parfois de manière homogène sur toute la glaçure comme sur les glaçures unies brun « sauce » et parfois de sorte à former des motifs comme les coulures brunes des glaçures de type « fourrure de lièvre » n'a pas été étudiée en détail. La température maximale atteinte au cours de la cuisson semble jouer un rôle sur ces motifs, puisque sur deux échantillons fabriqués avec la même préparation, celui chauffé à 1270°C présentait une glaçure avec des motifs « taches de rouille » alors que celui chauffé à 1320°C possédait des zones larges et irrégulières brun « sauce » sur un fond sombre. De nombreux autres paramètres jouent sans doute un rôle sur la formation de ces motifs. L'hétérogénéité introduite lors de la préparation de la glaçure selon sa granulométrie pourrait par exemple contribuer à une glaçure de couleur inhomogène. La nature minéralogique et la granulométrie de la pâte, dont le dégazement au cours de la cuisson créerait éventuellement des zones de glaçures plus ou moins visqueuse en fonction de l'état d'oxydation du fer, selon s'il s'effectue de manière homogène ou non, pourraient de même influencer l'aspect général de la surface de la glaçure. Pour vérifier ces hypothèses, des échantillons avec des pâtes et des glaçures de granulométrie et minéralogie contrôlée pourraient être élaborés.

En outre, l'influence de la composition chimique sur l'aspect de la glaçure a été principalement considérée à travers l'ajout de calcite. Il serait intéressant de vérifier l'influence d'autres éléments, notamment le magnésium, l'aluminium ou le titane. L'introduction dosée de défauts minéralogiques dans la glaçure crue, comme du zircon ou de gros cristaux de quartz pourrait également être effectuée pour documenter leur impact sur l'homogénéité de la cristallisation et modéliser ces systèmes complexes.

Les cristallisations à l'interface entre la pâte et la glaçure seraient également intéressantes à approfondir. L'influence du magnésium en particulier pourrait être pertinente à explorer, puisqu'il a été montré sur quelques tessons anciens qu'une formation d'indialite/cordiérite pouvait avoir lieu dans cette zone, qui se traduit par un enrichissement en cet élément. Cette influence pourrait être étudiée en mélangeant par exemple de la magnésite avec la matière première crue, comme il a été fait avec la calcite. De plus, l'utilisation d'engobes sur les cristallisations à cet interface pourrait être renseignée davantage, par exemple en ajoutant une couche de kaolin sous la glaçure, comme il était traditionnellement effectué, ou de gypse, de calcite, de dolomite ou de magnésite pour voir si elle aurait une influence. L'étude de ces interfaces pourrait enfin prendre en compte l'effet des dégourdis préalables des pâtes, pour voir si l'ajout de l'engobe peut compenser l'effet inhibiteur de cristallisation de ces traitements.

L'étude des possibilités d'épitaxies de la phase ϵ -Fe₂O₃ pourrait de plus être élargie, notamment par rapport à la mullite et au zircon qui sont présents classiquement sur les échantillons anciens. Pour cela, la fabrication de nouvelles lames minces par FIB localisées sur les interfaces entre les différentes phases suivie de leur étude par TKD ou ACOM peut être envisagée.

De manière plus large, cette phase étant un matériau à fort potentiel technologique grâce à ces propriétés magnétiques, il serait intéressant d'étudier les propriétés des dendrites poussant sur les échantillons anciens et les recreations pour voir si leurs substitutions cationiques les affectent, et si oui à quel point. Effectivement, si elles ne sont pas trop dégradées, la synthèse de la phase ϵ -Fe₂O₃ par une voie de cristallisation à haute température à partir d'une matrice vitreuse ressemblant au procédé de fabrication des glaçures anciennes pourrait être une alternative intéressante aux synthèses de nanoparticules et films minces actuellement développées, notamment pour former des cristaux de taille supérieure.

Du côté de la nomenclature de la famille des céramiques à glaçure brune et noire, une étude plus poussée des objets issus des collections des musées chinois permettrait de donner une vision plus exhaustive des expressions utilisées dans cette langue. La littérature chinoise moderne spécialisée a de plus été relativement peu considérée dans cette étude, en particulier à cause des difficultés de traductions, mais elle contient sans doute davantage de détails sur les subtilités des emplois des expressions imagées, comme entre « yóu dī » et « yǔdiǎn » par exemple. Il serait en outre très instructif de vérifier les textes anciens publiés au cours des différentes dynasties et dans plusieurs provinces pour approfondir les éventuelles variabilités de ces dernières selon les échelles spatiales et temporelles.

Bibliographie

- [1]A. Bailly, κέραμος, Le Grand Bailly - Dictionnaire Grec Français. (2000) 1080.
- [2]A. Bailly, κεραμικός, Le Grand Bailly - Dictionnaire Grec Français. (2000) 1080.
- [3]A. Brongniart, Traité des Arts Céramiques ou des Poteries considérées dans leur histoire, leur pratique et leur théorie, Béchét jeune et Mathias Augustin, Paris, 1844.
- [4]C.-E. Guignet, E. Garnier, La Céramique Ancienne et Moderne, Felix Alcan, Paris, 1899.
- [5]A. Bailly, κέρας, Le Grand Bailly - Dictionnaire Grec Français. (2000) 1080.
- [6]E. Huguet, Céramite, Dictionnaire de la Langue Française du seizième siècle. 2 (1925).
- [7]A. Bailly, κεραμίτις, Le Grand Bailly - Dictionnaire Grec Français. (2000) 1080.
- [8]Céramique, Dictionnaire de l'Académie française. (1878). <https://www.dictionnaire-academie.fr/article/A7C0927> (accessed January 19, 2021).
- [9]E. Grandidier, La Céramique Chinoise, Librairie de Firmin-Didot et Cie, Paris, 1894.
- [10]A. Jacquemart, E. Le Blant, Histoire Artistique, Industrielle et Commercial de la Porcelaine, J. Techener, Paris, 1861.
- [11]E. Garnier, Dictionnaire de la Céramique - faiences - grès - poteries, Librairie de l'Art, Paris, 1893.
- [12]Céramique, Dictionnaire de l'Académie Française. (Actuelle). <https://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9C1359> (accessed January 19, 2021).
- [13]11 bouteilles en terre cuite, (2021).
- [14]P. Blanchart, Les céramiques silicatées, Techniques de l'ingénieur. (2015). <https://doi.org/10.51257/a-v1-n4800>.
- [15]M. Coupeau, Etude sur la Dilatation des Pates Céramiques, Bull. Soc. Encour. Ind. Natl. (1898) 1274–1309.
- [16]Couverte, Dictionnaire de l'Académie française. (1762). <https://www.dictionnaire-academie.fr/article/A4C2713> (accessed January 19, 2021).
- [17]Couverte, Dictionnaire de l'Académie Française. (Actuelle). <https://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9C4715> (accessed January 19, 2021).
- [18]D. Lion-Goldschmidt, Les Poteries et Porcelaines Chinoises, Presses Universitaires De France, Paris, 1978.
- [19]M. Beurdeley, La céramique Chinoise, Editions Charles Moreau, Paris, 2005.
- [20]Couverte, Dictionnaire Larousse. (Actuelle). <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/couverte/20047> (accessed January 19, 2021).
- [21]A. d'Albis, Traité de la porcelaine de Sèvres, Faton, Dijon, 2003.
- [22]Esmail, Dictionnaire de l'Académie française. (1694). <https://www.dictionnaire-academie.fr/article/A1E0237> (accessed January 19, 2021).
- [23]Esmail, Dictionnaire de l'Académie française. (1718). <https://www.dictionnaire-academie.fr/article/A1E0237> (accessed January 19, 2021).
- [24]Email, Dictionnaire de l'Académie française. (1740). <https://www.dictionnaire-academie.fr/article/A3E0326> (accessed January 19, 2021).

- [25]Email, Dictionnaire de l'Académie française. (1835). <https://www.dictionnaire-academie.fr/article/A6E0466> (accessed January 19, 2021).
- [26]Email, Dictionnaire de l'Académie Française. (Actuelle). <https://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9E0835> (accessed January 19, 2021).
- [27]Vernis, Dictionnaire de l'Académie française. (1798). <https://www.dictionnaire-academie.fr/article/A5V0297> (accessed January 19, 2021).
- [28]Glaçure, Dictionnaire étymologique du CNRTL. (n.d.). <https://www.cnrtl.fr/etymologie/gla%C3%A7ure>.
- [29]Glaçure, Dictionnaire de l'Académie Française. (Actuelle). <https://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9G0780> (accessed January 19, 2021).
- [30]A. D'Anna, La céramique https://www.google.fr/books/edition/_/mUbWAAAAMAAJ?hl=fr&kptab=overview (accessed February 15, 2022).
- [31]J. Needham, Science and Civilisation in China Volume 5: Chemistry and Chemical Technology, Part XII: Ceramic Technology, Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
- [32]G. Da Cruz, Tractado em que se contam muito por extenso da China, 1569. purl.pt/22928 (accessed August 30, 2022).
- [33]F.-X. d'Entrecolles, Lettre du père d'Entrecolles au père Orry, in: Lettres édifiantes et curieuses concernant l'Asie, l'Afrique et l'Amérique avec quelques relations nouvelles des missions, et des notes géographiques et historiques, Société du Panthéon Littéraire, Paris, 1843.
- [34]S. Julien, Histoire et Fabrication de la Porcelaine Chinoise, Mallet-Bachelier, Paris, 1856.
- [35]cí (瓷), le Grand Ricci. (2017). <https://chinesereferenceshelf-brillonline-com.gorgone.univ-toulouse.fr/grand-ricci/entries/1421?highlight=瓷> (accessed September 10, 2020).
- [36]A. Brongniart, Traité des Arts Céramiques ou des Poteries considérées dans leur histoire, leur pratique et leur théorie, Béchét jeune et Mathias Augustin, Paris, 1844.
- [37]E. Huguët, Porcelayne, Dictionnaire de la Langue Française du seizième siècle. 6 (1925).
- [38]R. Finlay, The Pilgrim Art: The Culture of Porcelain in World History, Journal of World History. 9 (1998) 141–187. <https://doi.org/10.1353/jwh.2005.0099>.
- [39]táo (陶), le Grand Ricci. (2017). <https://chinesereferenceshelf-brillonline-com.gorgone.univ-toulouse.fr/grand-ricci/entries/9381?highlight=陶> (accessed December 16, 2020).
- [40]S. Powell, A History of Song Dynasty Ceramics, Troubador Publishing, 2012.
- [41]The Classic Age of Chinese Ceramics The Linyushanren Collection, Part I, 2015.
- [42]J. Astier, Minerais et fondants, Techniques de l'ingénieur. (2015). <https://doi.org/10.51257/a-v2-m7040>.
- [43]M. Crick, La céramique Impériale Song, 2013.
- [44]J.W.H. Schreurs, R.H. Brill, Iron and sulfur related colors in ancient glass, Archaeometry. 26 (1984) 199–209.
- [45]N. Wood, Chapter 7 - The Blackwares and Brownwares of China, in: Chinese Glazes: Their Origins, Chemistry and Recreation, University of Pennsylvania Press, 1999: pp. 137–158.
- [46]A. Hougron, La céramique chinoise ancienne, Les éditions de l'Amateur, Paris, 2015.
- [47]P. Bol, J. Kirby, Part 3 - Cosmopolitan Tang: Aristocratic Culture in China, in: ChinaX : History of China: Bronze Age to the Last Dynasties, HarvardX/EdX MOOC, n.d. <https://www.edx.org/xseries/china-civilization-empire?>

index=product&queryID=b79f60b827e31152a89fbc16114bb8d&position=1 (accessed December 1, 2020).

[48]S.G. Valenstein, *A Handbook of Chinese Ceramics*, Metropolitan Museum of Art, New York, 1989. https://www.google.fr/books/edition/A_Handbook_of_Chinese_Ceramics/wuVwuJvo4YgC?hl=fr&gbpv=0&kptab=overview.

[49]Black glazed stoneware saucer with milky-blue splashes, Ben Janssens Oriental Art. (n.d.). <http://www.benjanssens.com/portfolio/014-black-glazed-stoneware-saucer-milky-blue-splashes/> (accessed March 4, 2022).

[50]S. Rastelli, *The Yaozhou Kilns: A Re-Evaluation*, University of London, 2017.

[51]B. Shen, P. Sciau, T. Wang, M. Brunet, J. Li, W. Lu, T. Zhu, Micro-structural study of colored porcelains of Changsha kiln using imaging and spectroscopic techniques, *Ceram. Int.* 44 (2018) 18528–18534. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.07.074>.

[52]P. Bol, J. Kirby, Part 4 - Literati China: Examinations, Neo-Confucianism, and Later Imperial China, in: *ChinaX*

n.d. <https://www.edx.org/xseries/china-civilization-empire?>

index=product&queryID=b79f60b827e31152a89fbc16114bb8d&position=1 (accessed December 8, 2020).

[53]D. Kuhn, Chapter 6 - Education and Examination, in: *The Age of Confucian Rule, The Song Transformation of China*, Harvard University Press, Harvard, 2009: pp. 120–137.

[54]K.G. Deng, Demystifying growth and development in North Song China, 960–1127, *Economic History Working Papers*. (2013) 62.

[55]D. Kuhn, Chapter 10 - A Changing world of Production, in: *The Age of Confucian Rule, The Song Transformation of China*, Harvard University Press, Harvard, 2009: pp. 213–232.

[56]H.M. Hung, *Ten States, Five Dynasties, One Great Emperor: How Emperor Taizu Unified China in the Song Dynasty*, Algora Publishing, 2014.

[57]D. Kuhn, Chapter 2 - Model rulers, in: *The Age of Confucian Rule, The Song Transformation of China*, Harvard University Press, Harvard, 2009: pp. 29–48.

[58]Y. Wang, *The Northern Song Dynasty (960–1127)*, in: *Harmony and War - Confucian Culture and Chinese Power Politics*, Columbia University Press, 2011: pp. 34–76.

[59]P. Bol, *This culture of ours - Intellectual transitions in T'ang and Sung China*, Stanford University Press, Stanford, 1992.

[60]D. Kuhn, Chapter 5 - Three doctrines, in: *The Age of Confucian Rule, The Song Transformation of China*, Harvard University Press, Harvard, 2009: pp. 99–119.

[61]H. Qi, 宋代陶瓷的美学思想初探 (traduction par Sophie Duhem), *文化艺术创新*. 1 (2019). <https://doi.org/10.26549/whyscx.v1i1.2551>.

[62]D. Kuhn, Chapter 9 - Transforming the Capitals, in: *The Age of Confucian Rule, The Song Transformation of China*, Harvard University Press, Harvard, 2009: pp. 187–212.

[63]C. Chen, 宋代瓷器制造技术的考古学观察 (traduction par Sophie Duhem), *考古学报*. 4 (2017).

[64]A. Schottenhammer, The “China Seas” in world history: A general outline of the role of Chinese and East Asian maritime space from its origins to c. 1800, *J. Marine and Island Cultures*. 1 (2012) 63–86. <https://doi.org/10.1016/j.imic.2012.11.002>.

[65]H.R. Clark, 6- The Song: trade and economy, in: *Community, Trade, and Networks - Southerne Fujian Province from the Third to the Thirteenth Century*, Cambridge University Press, Cambridge, 1991: pp. 120–167.

- [66]H.R. Clark, 5- The Song: demography and networks, in: *Community, Trade, and Networks - Southerne Fujian Province from the Third to the Thirteenth Century*, Cambridge University Press, Cambridge, 1991: pp. 71–119.
- [67]M.-F. Dupoizat, *La céramique chinoise dans le commerce maritime du IXe au XVe siècle*, in: *L’Odysée de La Porcelaine Chinoise*, Réunion des musées nationaux, Paris, 2003.
- [68]D. Kuhn, Chapter 4 - The Song in the South, in: *The Age of Confucian Rule, The Song Transformation of China*, Harvard University Press, Harvard, 2009: pp. 71–98.
- [69]D. Kuhn, Chapter 11 - Money and Taxes, in: *The Age of Confucian Rule, The Song Transformation of China*, Harvard University Press, Harvard, 2009: pp. 233–250.
- [70]C. Lamouroux, Rites Espaces et Finances - La recomposition de la souveraineté dans la Chine du 11e siècle, *Annales HSS*. (1996) 275–305. <https://doi.org/10.3406/ahess.1996.410848>.
- [71]S. Kenderdine, Bai Jiao 1-the excavation of a Song Dynasty shipwreck in the Dinghai area, Fujian Province, China, 1995, *Int. J. Nautical Archaeology*. 24 (1995) 247–266.
- [72]C. Wu, A Summary on Shipwrecks of the Pre-contact Period and the Development of Regional Maritime Trade Network in East Asia, in: *Early Navigation in the Asia-Pacific Region - A Maritime Archaeological Perspective*, Xiamen, Fujian, 2016: pp. 1–24.
- [73]M. Tregear, Chinese Ceramic Imports to Japan between the Ninth and Fourteenth Centuries, *The Burlington Magazine*. 118 (1976) 816+818-825.
- [74]B. Zhao, Érudition, expertise technique et politique Taoji, *Arts asiatiques*. 61 (2006) 143–164. <https://doi.org/10.3406/arasi.2006.1645>.
- [75]B. Zhao, Traduction annotée du Taoji, in: *La Splendeur Du Feu, Chefs d’oeuvre de La Porcelaine Chinoise de Jingdezhen Du XIIe Au XVIIIe Siècle*, You Feng, Paris, 2006: pp. 185–188.
- [76]R.L. Hobson, *Chinese Pottery and Porcelain: An Account of the Potter’s Art in China from Primitive Times to the Present Day*, Cassell and Company, London, New York, Toronto and Melbourne, 1915.
- [77]L. Zhao, Elegant Style—Study on the Aesthetic Characteristics of Ceramics Art in the Song Dynasty, 2nd Asia-Pacific Management and Engineering Conference. (2016) 737–742.
- [78]K. Ma, *A Cup of Imperial Taste: The Formation of Ceramic Aesthetics under Emperor Huizong (r. 1100-1126)*, College of William and Mary, 2017.
- [79]X. Hu, 宋代分茶、斗茶技艺与建窑黑釉瓷茶盏研究 胡小军 (traduction par Sophie Duhem), *茶叶科学*. 30 (2010) 489–492.
- [80]J. Moser, Liquidity, Technicity, and the Predictive Turn in Chinese Ceramics, *Grey Room*. 69 (2018) 24–49. https://doi.org/10.1162/GREY_a_00230.
- [81]J.-M. Miao, C.-L. Lv, H. Li, T.-M. Chen, Non-destructive analysis of ‘original’ Song Dynasty Guan wares and later imitations, *Archaeometry*. 54 (2012) 955–973. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2012.00669.x>.
- [82]S. Rastelli, The Concept of the Five Famous Wares of the Song Dynasty —A Modern Invention, *Proceedings of International Symposium on Science and Technology of Five Great Wares of the Song Dynasty*. (2016) 7.
- [83]J. Girel, *L’Art des cinq éléments*, 2015.
- [84]T. Degawa, C. Déléry, *Porcelaine, chefs-d’œuvre de la collection Ise, Liénart*, Paris, 2017.
- [85]關氏所藏宋代陶瓷 : Song ceramics from the Kwan collection, 香港藝術館, Hong kong, 1994.
- [86]Song Dynasty Ceramics - The Ronald W. Longsdorf Collection, J. J. Lally&Co. oriental art, New York, 2013.

- [87]L. Rotondo-McCord, R.D. Mowry, *Heaven and earth seen within : Song ceramics from the Robert Barron collection*, University Press of Mississippi, 2000.
- [88]V. Fris-Larrouy, *Arts de Chine*, Adam Biro, 1999.
- [89]Y. Lu, X. Feng, M. Tregear, *Song ceramics - catalogue de l'exposition du National Museum de Singapour*, Southeast Asian Ceramic Society, Singapour, 1983.
- [90]*Song Ceramics - catalogue des exposition Tobu bijutsukan (Tokyo), Osaka Shiritsu Tôyô Tôji Bijutsukan (Osaka) et Yamaguchi kenritsu Hagi bijutsukan Uragami kinenkan (Hagi)*, Tokyo, Osaka, Hagi, 1999.
- [91]*The beauty of Song ceramics / 宋磁の美*, 大阪市立東洋陶磁美術館, Osaka, 2016.
- [92]R.D. Mowry, E. Farrell, N. Coolidge Rousmaniere, *Hare's fur, tortoiseshell, and partridge feathers : Chinese brown- and black-glazed ceramics, 400-1400*, Harvard University Art Museums, 1996.
- [93]R. Kerr, *Song dynasty ceramics*, V&A publications, Londres, 2004.
- [94]S. Pierson, *Song ceramics : art history, archaeology and technology : Colloquies on art and archaeology in Asia*, Percival David Foundation of Chinese Art, Londres, 2003.
- [95]M. Tregear, *Song ceramics : with 317 illustrations, 42 in colour, and 35 maps and line drawings*, Thames and Hudson, Londres, 1982.
- [96]J. Britt, *The Quest for the Illusive Leaf Bowl*, *CeramicsTECHNICAL*. 38 (2014) 84–88.
- [97]*Collections en ligne du Victoria and Albert Museum*, V&A Official Website. (n.d.). <https://www.vam.ac.uk/collections?type=featured>.
- [98]W. Li, H. Luo, J. Li, J. Li, J. Guo, *Studies on the microstructure of the black-glazed bowl sherds excavated from the Jian kiln site of ancient China*, *Ceram. Int.* 34 (2008) 1473–1480. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2007.04.004>.
- [99]P.B. Vandiver, C.L. Reedy, *Traditional craftsmanship and technology of Jianyang black wares from Fujian, China*, *Stud. Conserv.* 59 (2014) S169–S172. <https://doi.org/10.1179/204705814X13975704319073>.
- [100]songcimoyun, *建盏的内核秘密，釉水是怎么形成的！*, Chine, 2021. https://www.tiktok.com/@songcimoyun/video/7047178735577058565?_r=1 (accessed May 24, 2022).
- [101]jujusidiudiu, *建盏的制作*, Chine, 2022. https://www.tiktok.com/@jujusidiudiu/video/7094845356785143067?_r=1 (accessed May 24, 2022).
- [102]chayu722, *建盏烧制全过程，属实不容易，中间很多细节部分没有介绍，烧制成品率结合天时地利人和多重因素*, Chine, 2022. https://www.tiktok.com/@chayu722/video/7078278508266392837?_r=1 (accessed May 24, 2022).
- [103]M. Huang, *Traduction du Dà Guān Chá Lùn de l'empereur Huīzōng (1107)*, *Global Tea Hut*. 51 (2016) 35–48.
- [104]Z. Ren, F. Wang, C. Hole, P. Sciau, P. Shi, J. Zhu, H. Luo, Q. Li, T. Wang, *Study of sauce glazed wares from Yaozhou kilns (Northern Song Dynasty, 960-1127 AD): probing the morphology and structure of crystals in the glazes*, *J. Eur. Ceram. Soc.* (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.08.013>.
- [105]*Collections en ligne du British Museum*, The British Museum Official Website. (n.d.). <https://www.britishmuseum.org/collection>.

- [106] Collections en ligne du Smithsonian Museum, The Smithsonian Official Website. (n.d.). <https://www.si.edu/collections>.
- [107] Collections exposées du Musée Guimet, (n.d.).
- [108] M. Butler, La Butler Family Collection, supplément au catalogue de 1990, 1994.
- [109] T. Wu, *Earth Transformed: Chinese Ceramics in the Museum of Fine Arts*, Boston, MFA Publications, Université du Michigan, 2001.
- [110] *Song ceramics & works of art*
Londres, 2014.
- [111] X. Li, J. Lu, X. Yu, J. Zhou, L. Li, Imitation of ancient black-glazed Jian bowls (Yohen Tenmoku): Fabrication and characterization, *Ceram. Int.* 42 (2016) 15269–15273. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.06.027>.
- [112] L. Wang, Y. Wang, M. Zhang, Q. Li, J. Wu, Z. Liu, L. Li, X. Wei, Three-Dimensional Microstructure of ϵ -Fe₂O₃ Crystals in Ancient Chinese Sauce Glaze Porcelain Revealed by Focused Ion Beam Scanning Electron Microscopy, *Anal. Chem.* 91 (2019) 13054–13061. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.9b03244>.
- [113] C.-H. Nien, 宋代鬥茶內涵的轉折：以蔡襄茶學理論為核心的討論 (traduction par Sophie Duhem), *Journal d'histoire de l'Université nationale de Chengchi.* 41 (2011) 175–198.
- [114] Q. Guo, 淄博兩點釉瓷的研究 (traduction par Sophie Duhem), *陶瓷研究.* 11 (1996) 10–23.
- [115] “鷓鴣斑”和“油滴”是否為同一種建盞的爭論 (traduction par Sophie Duhem), (n.d.). <http://www.guanfujianzhan.com/7433.html> (accessed September 8, 2022).
- [116] Z. Liu, C. Jia, L. Li, X. Li, L. Ji, L. Wang, Y. Lei, X. Wei, The morphology and structure of crystals in Qing Dynasty purple-gold glaze excavated from the Forbidden City, *J. Am. Ceram. Soc.* 101 (2018) 5229–5240. <https://doi.org/10.1111/jace.15759>.
- [117] C. Dejoie, P. Sciau, W. Li, L. Noé, A. Mehta, K. Chen, H. Luo, M. Kunz, N. Tamura, Z. Liu, Learning from the past: Rare ϵ -Fe₂O₃ in the ancient black-glazed Jian (Tenmoku) wares, *Sci. Rep.* 4 (2014) 4941. <https://doi.org/10.1038/srep04941>.
- [118] teaculture18, 2600 萬落錘茶碗拿來吃螺螄粉是何等的享受!#瓷器 #收藏 #古玩 #手工藝 #茶 #茶碗, Chine, 2021. https://www.tiktok.com/@teaculture18/video/6986984471358688517?_r=1&is_from_webapp=v1&item_id=6986984471358688517 (accessed May 24, 2022).
- [119] S. Harrison, Australia's Maunt Gibraltar Pitted, Pock Marked and Pin-holed - Steve Harrison describes the Tenmoku on the edge of town, *CeramicsTECHNICAL.* (2010) 110–113.
- [120] C. Devine, *Revealing Oil Spots*, Wordpress.Com. (2013). <https://northernbeachesceramics.files.wordpress.com/2013/12/revealing-oil-spots-13nov12.pdf> (accessed November 19, 2019).
- [121] Poterie. La renaissance d'une feuille morte, *Le Télégramme.* (2014).
- [122] W. Buggakupta, C. Tianthong, P. Phermpoonboon, J. Tawwuttanakidkul, S. Jiemsirilers, When EAF Dust and Mill Scale from Steelmaking Process Turn to Raw Materials for Tenmoku Oil Spot Glaze, *Mater. Today: Proc.* 5 (2018) 22262–22274.
- [123] O. Karlbeck, Notes on the Wares from the Chiao Tso Potteries, *Ethnos.* 8 (1943) 81–95.
- [124] Z. Yu, X. Hu, Y. Zheng, Y. Lin, Mössbauer studies on ancient Jizhou plain Temmoku porcelains, *Hyperfine Interact.* 91 (1994) 675–678.
- [125] E. Tronc, C. Chanéac, J.P. Jolivet, Structural and Magnetic Characterization of ϵ -Fe₂O₃, *J. Solid State Chem.* 139 (1998) 93–104.

- [126]H. Forestier, G. Guiot-Guillain, Une nouvelle variété ferromagnétique de sesquioxyde de fer, *C. R. Seances Acad. Sci. Paris.* 199 (1934) 720–724.
- [127]R. Schrader, G. Büttner, Eine neue Eisen(III)-oxidphase: ϵ -Fe₂O₃, *Z. Anorg. Allg. Chem.* (1963).
- [128]J.-M. Trautmann, H. Forestier, Nouvelle préparation et étude de l'oxyde ϵ -Fe₂O₃, *C. R. Acad. Sc. Paris.* 261 (1965) 4423–4425.
- [129]I. Dézsi, J.M.D. Coey, Magnetic and thermal properties of ϵ -Fe₂O₃, *Phys. Stat. Sol. (a).* 15 (1973) 681–685. <https://doi.org/10.1002/pssa.2210150239>.
- [130]R. Zboril, M. Mashlan, D. Petridis, Iron(III) Oxides from Thermal Processes Synthesis, Structural and Magnetic Properties, Mössbauer Spectroscopy Characterization, and Applications, *Chem. Mater.* 14 (2002) 969–982. <https://doi.org/10.1021/cm0111074>.
- [131]M. Gich, C. Frontera, A. Roig, E. Taboada, E. Molins, H.R. Rechenberg, J.D. Ardisson, W.A.A. Macedo, C. Ritter, V. Hardy, J. Sort, V. Skumryev, J. Nogués, High- and Low-Temperature Crystal and Magnetic Structures of ϵ -Fe₂O₃ and Their Correlation to Its Magnetic Properties, *Chem. Mater.* 18 (2006) 3889–3897. <https://doi.org/10.1021/cm060993l>.
- [132]S. Sakurai, J. Shimoyama, K. Hashimoto, S. Ohkoshi, Large coercive field in magnetic-field oriented ϵ -Fe₂O₃ nanorods, *Chem. Phys. Lett.* 458 (2008) 333–336. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2008.04.121>.
- [133]J. Tuček, R. Zbořil, A. Namai, S. Ohkoshi, ϵ -Fe₂O₃ Giant Coercive Field, Millimeter-Wave Ferromagnetic Resonance, and Magnetoelectric Coupling, *Chem. Mater.* 22 (2010) 6483–6505. <https://doi.org/10.1021/cm101967h>.
- [134]I. Ahamed, R. Pathak, R. Skomski, A. Kashyap, Magnetocrystalline anisotropy of ϵ -Fe₂O₃, *AIP Adv.* 8 (2018) 055815. <https://doi.org/10.1063/1.5007659>.
- [135]I. Ahamed, R. Skomski, A. Kashyap, Controlling the magnetocrystalline anisotropy of ϵ -Fe₂O₃, *AIP Advances.* 9 (2019) 035231. <https://doi.org/10.1063/1.5080144>.
- [136]S. Ohkoshi, A. Namai, K. Imoto, M. Yoshikiyo, W. Tarora, K. Nakagawa, M. Komine, Y. Miyamoto, T. Nasu, S. Oka, H. Tokoro, Nanometer-size hard magnetic ferrite exhibiting high optical-transparency and nonlinear optical-magnetoelectric effect, *Sci. Rep.* 5 (2015) 14414. <https://doi.org/10.1038/srep14414>.
- [137]T. Nasu, M. Yoshikiyo, H. Tokoro, A. Namai, S. Ohkoshi, First-Principles Calculations and Optical Absorption Spectrum of a Light-Colored Aluminum-Substituted ϵ -Iron Oxide Magnet, *Eur. J. Inorg. Chem.* 2017 (2017) 531–534. <https://doi.org/10.1002/ejic.201601169>.
- [138]G. Carraro, C. Maccato, A. Gasparotto, T. Montini, S. Turner, O.I. Lebedev, V. Gombac, G. Adami, G. Van Tendeloo, D. Barreca, P. Fornasiero, Enhanced Hydrogen Production by Photoreforming of Renewable Oxygenates Through Nanostructured Fe₂O₃ Polymorphs, *Adv. Funct. Mater.* 24 (2014) 372–378. <https://doi.org/10.1002/adfm.201302043>.
- [139]K.C. Barick, B.S.D.Ch.S. Varaprasad, D. Bahadur, Structural and magnetic properties of γ - and ϵ -Fe₂O₃ nanoparticles dispersed in silica matrix, *J. Non-Cryst. Solids.* 356 (2010) 153–159. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2009.10.001>.
- [140]I.K. Battisha, H.H. Afify, I.M. Hamada, Structural and magnetic susceptibility studies of SiO₂:Fe₂O₃ nano-composites prepared by sol–gel technique, *J. Magn. Magn. Mater.* 292 (2005) 440–446. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2004.10.121>.
- [141]M. Kurmoo, J.-L. Rehspringer, A. Hutlova, C. D'Orléans, S. Vilminot, C. Estournès, D. Niznansky, Formation of Nanoparticles of ϵ -Fe₂O₃ from Yttrium Iron Garnet in a Silica Matrix: An Unusually Hard Magnet with a Morin-Like Transition below 150 K, *Chem. Mater.* 17 (2005) 1106–1114.

- [142]A. Mantlikova, J. PoltieroVa Vejpravova, B. Bittova, S. Burianova, D. Niznansky, A. Ardu, C. Cannas, Stabilization of the high coercivity phase in the nanocomposites, *J. Solid State Chem.* 191 (2012) 136–141. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2012.03.022>.
- [143]V.N. Nikolić, M. Tadić, M. Panjan, L. Kopanja, N. Cvjetičanin, V. Spasojević, Influence of annealing treatment on magnetic properties of Fe₂O₃/SiO₂ and formation of ε-Fe₂O₃ phase, *Ceram. Int.* 43 (2017) 3147–3155. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.11.132>.
- [144]J. López-Sánchez, A. Serrano, A. Del Campo, M. Abuín, O. Rodríguez de la Fuente, N. Carmona, Sol–Gel Synthesis and Micro-Raman Characterization of ε-Fe₂O₃ Micro- and Nanoparticles, *Chem. Mater.* 28 (2016) 511–518. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b03566>.
- [145]J. López-Sánchez, A. Muñoz-Noval, A. Serrano, M. Abuín, J. de la Figuera, J.F. Marco, L. Pérez, N. Carmona, O. Rodríguez de la Fuente, Growth, structure and magnetism of ε-Fe₂O₃ in nanoparticle form, *RSC Adv.* 6 (2016) 46380–46387. <https://doi.org/10.1039/C6RA01912A>.
- [146]E. Delahaye, V. Escax, N. El Hassan, A. Davidson, R. Aquino, V. Dupuis, R. Perzynski, Y.L. Raikher, “Nanocasting”: Using SBA-15 Silicas as Hard Templates to Obtain Ultrasmall Monodispersed γ-Fe₂O₃ Nanoparticles, *J. Phys. Chem. B.* 110 (2006) 26001–26011. <https://doi.org/10.1021/jp0647075>.
- [147]G.A. Bukhtiyarova, O.N. Mart’yanov, S.S. Yakushkin, M.A. Shuvaeva, O.A. Bayukov, State of iron in nanoparticles prepared by impregnation of silica gel and aluminum oxide with FeSO₄ solutions, *Phys. Solid State.* 52 (2010) 826–837. <https://doi.org/10.1134/S1063783410040268>.
- [148]G.A. Bukhtiyarova, M.A. Shuvaeva, O.A. Bayukov, S.S. Yakushkin, O.N. Martyanov, Facile synthesis of nanosized ε-Fe₂O₃ particles on the silica support, *J. Nanopart. Res.* 13 (2011) 5527–5534. <https://doi.org/10.1007/s11051-011-0542-5>.
- [149]T. Nakamura, Y. Yamada, K. Yano, Novel synthesis of highly monodispersed γ-Fe₂O₃/SiO₂ and ε-Fe₂O₃/SiO₂ nanocomposite spheres, *J. Mater. Chem.* 16 (2006) 2417–2419. <https://doi.org/10.1039/B604025J>.
- [150]K. Kelm, W. Mader, Synthesis and Structural Analysis of ε-Fe₂O₃, *Z. Anorg. Allg. Chem.* 631 (2005) 2383–2389. <https://doi.org/10.1002/zaac.200500283>.
- [151]B. David, N. Pizúrová, P. Synek, V. Kudrle, O. Jašek, O. Schneeweiss, ε-Fe₂O₃ nanoparticles synthesized in atmospheric-pressure microwave torch, *Mater. Lett.* 116 (2014) 370–373. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.11.057>.
- [152]M. Gich, I. Fina, A. Morelli, F. Sánchez, M. Alexe, J. Gàzquez, J. Fontcuberta, A. Roig, Multiferroic Iron Oxide Thin Films at Room Temperature, *Adv. Mater.* 26 (2014) 4645–4652. <https://doi.org/10.1002/adma.201400990>.
- [153]L. Corbellini, Growth and Characterization of Epitaxial Thin Films of Epsilon Ferrite (ε-Fe₂O₃), 2017.
- [154]A. Tanskanen, O. Mustonen, M. Karppinen, Simple ALD process for ε-Fe₂O₃ thin films, *APL Mater.* 5 (2017) 056104. <https://doi.org/10.1063/1.4983038>.
- [155]S.S. Kulkarni, C.D. Lokhande, Structural, optical, electrical and dielectrical properties of electrosynthesized nanocrystalline iron oxide thin films, *Mater. Chem. Phys.* 82 (2003) 151–156. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(03\)00212-8](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(03)00212-8).
- [156]S. Lee, H. Xu, Size-Dependent Phase Map and Phase Transformation Kinetics for Nanometric Iron(III) Oxides (γ → ε → α Pathway), *J. Phys. Chem. C.* 120 (2016) 13316–13322. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b05287>.
- [157]J. Jin, S. Ohkoshi, K. Hashimoto, Giant Coercive Field of Nanometer- Sized Iron Oxide, *Adv. Mater.* 16 (2004) 48–51. <https://doi.org/10.1002/adma.200305297>.

- [158]L. Machala, J. Tuček, R. Zbořil, Polymorphous Transformations of Nanometric Iron(III) Oxide: A Review, *Chem. Mater.* 23 (2011) 3255–3272. <https://doi.org/10.1021/cm200397g>.
- [159]M. Gich, A. Roig, E. Taboada, E. Molins, C. Bonafos, E. Snoeck, Stabilization of metastable phases in spatially restricted fields: the case of the Fe₂O₃ polymorphs, *Faraday Discuss.* 136 (2007) 345. <https://doi.org/10.1039/b616097b>.
- [160]S. Ohkoshi, H. Tokoro, Hard Magnetic Ferrite: ϵ -Fe₂O₃, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* 86 (2013) 897–907. <https://doi.org/10.1246/bcsj.20130120>.
- [161]S. Ohkoshi, S. Sakurai, J. Jin, K. Hashimoto, The addition effects of alkaline earth ions in the chemical synthesis of ϵ -Fe₂O₃ nanocrystals that exhibit a huge coercive field, *J. Appl. Phys.* 97 (2005) 10K312. <https://doi.org/10.1063/1.1855615>.
- [162]Y. Kusano, T. Fujii, J. Takada, M. Fukuhara, A. Doi, Y. Ikeda, M. Takano, Epitaxial Growth of ϵ -Fe₂O₃ on Mullite Found through Studies on a Traditional Japanese Stoneware, *Chem. Mater.* 20 (2008) 151–156. <https://doi.org/10.1021/cm7023247>.
- [163]Q. Hoo, Y. Liang, X. Yan, X. Wang, T. Cao, X. Cao, Millimeter-sized flower-like clusters composed of mullite and ϵ -Fe₂O₃ on the Hare's Fur Jian Ware, *J. Eur. Ceram. Soc.* 40 (2020) 4340–4347. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.04.032>.
- [164]Y. Xu, Y. Qin, F. Ding, Characterization of the rare oil spot glazed bowl excavated from the Xiao kiln site of north China, *Ceram. Int.* 43 (2017) 8636–8642. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.03.177>.
- [165]R. Wen, D. Wang, L. Wang, Y. Dang, The colouring mechanism of the Brown glaze porcelain of the Yaozhou Kiln in the Northern Song Dynasty, *Ceram. Int.* 45 (2019) 10589–10595. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.02.125>.
- [166]D. Zhong, M. Guo, Y. Liu, S. Liu, J. Dong, Q. Li, Nondestructive analysis of iron rich porcelains excavated from Qingliangsi Site in Baofeng Country, Henan Province, *Spectrosc. Spectral Anal.* 39 (2019) 172–179.
- [167]P. Sciau, C. Brouca-Cabarrecq, A. Pinto, Les glaçures de céramiques chinoises colorées au fer : un matériau historique à fort potentiel en science de la matière ?, *Technè.* (2019) 144–149. <https://doi.org/10.4000/technè.1619>.
- [168]J. Wang, W.B. White, J.H. Adair, Optical Properties of Hydrothermally Synthesized Hematite Particulate Pigments, *J. Am. Ceram. Soc.* 88 (2005) 3449–3454. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2005.00643.x>.
- [169]P. Li, Occurrence and Health Implication of Fluoride in Groundwater of Loess Aquifer in the Chinese Loess Plateau: A Case Study of Tongchuan, Northwest China, *Exposure Health.* 11 (2019) 95–107. <https://doi.org/10.1007/s12403-018-0278-x>.
- [170]J. Sun, Rencontre entre Philippe Sciau et Jianxing Sun, (2019).
- [171]W. Deng, J. Cheng, P. Tian, M. Wang, Chemical durability and weathering resistance of canasite based glass and glass-ceramics, *J. Non-Cryst. Solids.* 358 (2012) 2847–2854. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2012.07.003>.
- [172]T. Palomar, Chemical composition and alteration processes of glasses from the Cathedral of León (Spain), *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio.* 57 (2018) 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2017.10.001>.
- [173]N. Carmona, M.A. Villegas, J.M. Fernández Navarro, Corrosion behaviour of R₂O–CaO–SiO₂ glasses submitted to accelerated weathering, *J. Eur. Ceram. Soc.* 25 (2005) 903–910. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2004.05.004>.

- [174]X. Chen, W. Li, C. Xu, X. Lu, Angle dependence of Jian bowl color and its coloring mechanism, *J. Eur. Ceram. Soc.* 42 (2022) 693–706. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.10.057>.
- [175]Ph. Sciau, Ph. Salles, C. Roucau, A. Mehta, G. Benassayag, Applications of focused ion beam for preparation of specimens of ancient ceramic for electron microscopy and synchrotron X-ray studies, *Micron.* 40 (2009) 597–604. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2009.02.012>.
- [176]Ph. Sciau, Chapter Two - Transmission Electron Microscopy: Emerging Investigations for Cultural Heritage Materials, in: P.W. Hawkes (Ed.), *Advances in Imaging and Electron Physics*, Elsevier, 2016: pp. 43–67. <https://doi.org/10.1016/bs.aiep.2016.09.002>.
- [177]H.M. Rietveld, A profile refinement method for nuclear and magnetic structures, *J Appl Crystallogr.* 2 (1969) 65–71. <https://doi.org/10.1107/S0021889869006558>.
- [178]R.A. Young, *The Rietvelt Method*, Oxford University Press, Oxford, 1993.
- [179]J. Rodríguez-Carvajal, Recent advances in magnetic structure determination by neutron powder diffraction, *Physica B: Condensed Matter.* 192 (1993) 55–69. [https://doi.org/10.1016/0921-4526\(93\)90108-I](https://doi.org/10.1016/0921-4526(93)90108-I).
- [180]F. Momprou, R. Xie, *pycotem* characterization from TEM imaging and diffraction, *Journal of Microscopy.* 282 (2021) 84–97. <https://doi.org/10.1111/jmi.12982>.
- [181]K. Momma, F. Izumi, *VESTA 3* for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data, *J. Appl. Crystallogr.* 44 (2011) 1272–1276. <https://doi.org/10.1107/S0021889811038970>.
- [182]D. Viladot, M. Véron, M. Gemmi, F. Peiró, J. Portillo, S. Estradé, J. Mendoza, N. Llorca-Isern, S. Nicolopoulos, Orientation and phase mapping in the transmission electron microscope using precession-assisted diffraction spot recognition: state-of-the-art results, *Journal of Microscopy.* 252 (2013) 23–34. <https://doi.org/10.1111/jmi.12065>.
- [183]L. Pichon, T. Calligaro, Q. Lemasson, B. Moignard, C. Pacheco, Programs for visualization, handling and quantification of PIXE maps at the AGLAE facility, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* 363 (2015) 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.08.086>.
- [184]T. Wang, P. Chen, M. Wang, Z. Sang, P. Zhang, F. Wang, P. Sciau, Micro-structural study of Yaozhou celadons (Tang to Yuan Dynasty): probing crystalline and glassy phases, *J. Eur. Ceram. Soc.* 40 (2020) 4676–4683. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.03.066>.
- [185]P.L. Leung, M.J. Stokes, C. Tiemei, Q. Dashu, A study of Ancient Chinese Porcelain wares of the Song-Yuan Dynasties from Cizhou and Ding kilns with Dispersive X-ray Fluorescence, *Archaeometry.* 42 (2000) 129–140.
- [186]J. Cui, N. Wood, Q. Dashu, L. Zhou, M. Ko, X. Li, Chemical analysis of white porcelains from the Ding Kiln site, Hebei Province, China, *J. Archaeol. Sci.* 39 (2012) 818–827.
- [187]T. Wang, C. Hole, Z. Ren, P. Zhang, P. Shi, J. Zhu, H. Luo, F. Wang, P. Sciau, Morphological and structural study of crystals in black-to-brown glazes of Yaozhou ware (Song dynasty) using imaging and spectroscopic techniques, *J. Eur. Ceram. Soc.* 41 (2021) 6049–6058. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.05.025>.
- [188]F. Chargui, M. Hamidouche, H. Belhouche, Y. Jorand, R. Doufnoune, G. Fantozzi, Mullite fabrication from natural kaolin and aluminium slag, *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio.* 57 (2018) 169–177.
- [189]Y.-F. Chen, M.-C. Wang, M.-H. Hon, Phase transformation and growth of mullite in kaolin ceramics, *J. Eur. Ceram. Soc.* 24 (2004) 2389–2397. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00631-](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00631-)

- [190]L. Andrini, M.R. Gauna, M.S. Conconi, G. Suarez, F.G. Requejo, E.F. Aglietti, N.M. Rendtorff, Extended and local structural description of a kaolinitic clay, its fired ceramics and intermediates: An XRD and XANES analysis, *Appl. Clay Sci.* 124–125 (2016) 39–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2016.01.049>.
- [191]G. Lecomte-Nana, J.-P. Bonnet, N. Soro, Influence of iron on the occurrence of primary mullite in kaolin based materials: A semi-quantitative X-ray diffraction study, *J. Eur. Ceram. Soc.* 33 (2013) 669–677. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.10.033>.
- [192]L. Pagliari, M. Dapiaggi, A. Pavese, F. Francescon, A kinetic study of the quartz–cristobalite phase transition, *J. Eur. Ceram. Soc.* 33 (2013) 3403–3410. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2013.06.014>.
- [193]G. Aubert, C. Guillemin, R. Pierrot, *Précis de Minéralogie*, Masson, Paris, 1978.
- [194]H. Schneider, H. Rager, Iron incorporation in mullite, *Ceram. Int.* 12 (1986) 117–125. [https://doi.org/10.1016/0272-8842\(86\)90034-9](https://doi.org/10.1016/0272-8842(86)90034-9).
- [195]H. Schneider, J. Schreuer, B. Hildmann, Structure and properties of mullite—A review, *J. Eur. Ceram. Soc.* 28 (2008) 329–344. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.03.017>.
- [196]Z. Ren, F. Wang, C. Hole, P. Sciau, P. Shi, J. Zhu, H. Luo, Q. Li, T. Wang, Study of sauce glazed wares from Yaozhou kilns (Northern Song Dynasty, 960–1127 CE): Probing the morphology and structure of crystals in the glazes, *Journal of the European Ceramic Society.* (2022) S0955221922006161. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.08.013>.
- [197]K. Yamada, M. Yoshikiyo, A. Namai, S. Ohkoshi, Mössbauer study of ϵ -Al_xFe_{2-x}O₃ nanomagnets, *Hyperfine Interact.* 205 (2012) 117–120. <https://doi.org/10.1007/s10751-011-0442-1>.
- [198]V.V. Sharygin, V.S. Kamenetsky, L.M. Zhitova, A.B. Belousov, A. Abersteiner, Copper-Containing Magnesioferrite in Vesicular Trachyandesite in a Lava Tube from the 2012–2013 Eruption of the Tolbachik Volcano, Kamchatka, Russia, *Miner.* 8 (2018) 514–536. <https://doi.org/doi:10.3390/min8110514>.
- [199]R.D. Shannon, J.A. Pask, Kinetics of the Anatase-Rutile Transformation, *J. Am. Ceram. Soc.* 48 (1965) 391–398.
- [200]A. Kaiser, M. Lobert, R. Telle, Thermal stability of zircon (ZrSiO₄), *J. Eur. Ceram. Soc.* 28 (2008) 2199–2211.
- [201]F. Bouree, J.L. Baudour, E. Elbadraoui, J. Musso, C. Laurent, A. Rousset, Crystal and magnetic structure of piezoelectric, ferrimagnetic and magnetoelectric aluminium iron oxide FeAlO₃ from neutron powder diffraction, *Acta Crystallogr. B Struct. Sci.* 52 (1996) 217–222. <https://doi.org/10.1107/S0108768195010330>.
- [202]S. Nishikawa, S. Kikuchi, Diffraction of Cathode Rays by Mica, *Nature.* 121 (1928) 1019–1020.
- [203]G.C. Sneddon, P.W. Trimby, J.M. Cairney, Transmission Kikuchi diffraction in a scanning electron microscope: A review, *Mater. Sci. Eng., R.* 110 (2016) 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2016.10.001>.
- [204]P. Richet, Y. Bottinga, Anorthite, andesine, wollastonite, diopside, cordierite and pyrope: thermodynamics of melting, glass transitions, and properties of the amorphous phases, *Earth Planet. Sci. Lett.* 67 (1984) 415–432.
- [205]C. Leonelli, T. Manfredini, M. Paganelli, P. Pozzi, G.C. Pellacani, Crystallization of some anorthite-diopside glass precursors, *J. Mater. Sci.* 26 (1991) 5041–5046. <https://doi.org/10.1007/BF00549889>.

- [206]I. Cianchetta, K. Trentelman, J. Maish, D. Saunders, B. Foran, M. Walton, Ph. Sciau, T. Wang, E. Pouyet, M. Cotte, F. Meirer, Y. Liu, P. Pianetta, A. Mehta, Evidence for an unorthodox firing sequence employed by the Berlin Painter: deciphering ancient ceramic firing conditions through high-resolution material characterization and replication, *J. Anal. At. Spectrom.* 30 (2015) 666–676. <https://doi.org/10.1039/C4JA00376D>.
- [207]Z.Z. Djuric, O.S. Aleksic, M.V. Nikolic, N. Labus, M. Radovanovic, M.D. Lukovic, Structural and electrical properties of sintered Fe₂O₃/TiO₂ nanopowder mixtures, *Ceram. Int.* 40 (2014) 15131–15141. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.06.126>.
- [208]I. Chamritski, G. Burns, Infrared- and Raman-Active Phonons of Magnetite, Maghemite, and Hematite: A Computer Simulation and Spectroscopic Study, *J. Phys. Chem. B.* 109 (2005) 4965–4968. <https://doi.org/10.1021/jp048748h>.
- [209]V.S.F. Muralha, T. Rehren, R.J.H. Clark, Characterization of an iron smelting slag from Zimbabwe by Raman microscopy and electron beam analysis, *J. Raman Spectrosc.* 42 (2011) 2077–2084. <https://doi.org/10.1002/jrs.2961>.
- [210]C. Katsen, G. Carl, C. Rüssel, The Influence of the Iron concentration and the Fe²⁺/Fe³⁺ Redox Ratio on the Crystallisation of Bioverit I1, *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.* 100 (1996) 1462–1465.
- [211]M.M. Smedskjaer, Y. Yue, J. Deubener, H.P. Gunnlaugsson, S. Mørup, Modifying glass surfaces via internal diffusion, *J. Non-Cryst. Solids.* 356 (2010) 290–298. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2009.12.004>.
- [212]M.M. Smedskjaer, Y. Yue, Redox reactions and inward cationic diffusion in glasses caused by CO and H₂ gases, *Solid State Ionics.* 180 (2009) 1121–1124. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2009.05.009>.
- [213]L.J. Shelestaf, R.A. Chavez, J.D. Mackenzie, B. Dunn, Glasses and Glass-ceramics from naturally occurring CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ Materials (II) Crystallization Behavior, *J. Non-Cryst. Solids.* 27 (1978) 83–97.
- [214]G.B. Cook, R.F. Cooper, T. Wu, Chemical diffusion and crystalline nucleation during oxidation of ferrous iron-bearing magnesium aluminosilicate glass, *J. Non-Cryst. Solids.* 120 (1990) 207–222. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(90\)90205-Z](https://doi.org/10.1016/0022-3093(90)90205-Z).
- [215]J.L. Barton, D. Banner, D. Caurant, F. Pincemin, The oxidation of ferrous ion in glass at high temperature, *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio.* 31C (1992) 215–220.
- [216]R. Terai, R. Hayami, Ionic Diffusion in Glasses, *J. Non-Cryst. Solids.* 18 (1975) 217–264.
- [217]Y. Kusano, H. Nakata, Z. Peng, R.S.S. Maki, T. Ogawa, M. Fukuhara, Studying and Utilizing Traditional Technologies: Microstructure and Formation Mechanism of ε-Fe₂O₃ on Traditional Japanese Bizen Stoneware, *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 13 (2021) 38491–38498. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c09394>.
- [218]A. Feenstra, S. Sämann, B. Wunder, An Experimental Study of Fe–Al Solubility in the System Corundum–Hematite up to 40 kbar and 1300°C, *J. Petrol.* 46 (2005) 1881–1892. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi038>.
- [219]X. Gu, Near Atomic Row Matching in the Interface Analyzed in Both Direct and Reciprocal Space, *Crystals.* 10 (2020) 192. <https://doi.org/10.3390/cryst10030192>.
- [220]A. Nahhas, H.K. Kim, J. Blachere, Epitaxial growth of ZnO films on Si substrates using an epitaxial GaN buffer, *Appl. Phys. Lett.* 78 (2001) 1511–1513. <https://doi.org/10.1063/1.1355296>.
- [221]J. Liu, J. Zhang, Nanointerface Chemistry: Lattice-Mismatch-Directed Synthesis and Application of Hybrid Nanocrystals, *Chem. Rev.* 120 (2020) 2123–2170. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00443>.

- [222]H.-J. Yang, R.J. Kinzler, T.L. Grove, Experiments and models of anhydrous, basaltic olivine-plagioclase-augite saturated melts from 0.001 to 10 kbar, *Contrib. Mineral. Petrol.* 124 (1996) 1–18. <https://doi.org/10.1007/s004100050169>.
- [223]L.A.B. Pilkington, Review Lecture: The float glass process, *Proc. Roy. Soc. Lond.* 314 (1969) 26.
- [224]S. Takeda, R. Akiyama, H. Hosono, Precipitation of nanometer-sized SnO₂ crystals and Sn depth profile in heat-treated float glass, *J. Non-Cryst. Solids.* 311 (2002) 273–280. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(02\)01374-1](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(02)01374-1).
- [225]G.H. Frischat, Tin ions in float glass cause anomalies, *C. R. Chimie.* 5 (2002) 759–763. [https://doi.org/10.1016/S1631-0748\(02\)01436-4](https://doi.org/10.1016/S1631-0748(02)01436-4).
- [226]C. Kasten, G. Carl, C. Rüssel, The influence of the iron concentration and the Fe²⁺/Fe³⁺ redox ratio on the crystallisation of Bioverit II, *Berichte Der Bunsengesellschaft Für Physikalische Chemie.* 100 (1996) 1462–1465. <https://doi.org/10.1002/bbpc.19961000922>.
- [227]S. Kumar, K.K. Singh, P. Ramachandrarao, Synthesis of cordierite from fly ash and its refractory properties, *J. Mater. Sci. Lett.* 19 (2000) 1263–1265.
- [228]R. Goren, H. Gocmez, C. Ozgur, Synthesis of cordierite powder from talc, diatomite and alumina, *Ceram. Int.* 32 (2006) 407–409. <https://doi.org/doi:10.1016/j.ceramint.2005.03.016>.
- [229]Y. Ren, Q. Ren, X. Wu, J. Zheng, O. Hai, Recycling of solid wastes ferrochromium slag for preparation of eco-friendly high-strength spinel–corundum ceramics, *Mater. Chem. Phys.* 239 (2020) 122060. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122060>.
- [230]Y. Leon, C. Lofrumento, A. Zoppi, R. Carles, E.M. Castellucci, Ph. Sciau, Micro-Raman investigation of *terra sigillata* slips: a comparative study of central Italian and southern Gaul productions: Micro-Raman investigation of *terra sigillata* slips from Italy and Gaul, *J. Raman Spectrosc.* 41 (2010) 1550–1555. <https://doi.org/10.1002/jrs.2678>.
- [231]M. Wang, T. Wang, F. Wang, C. Hole, J. Cao, J. Zhu, P. Zhang, P. Shi, P. Sciau, Raman study of rusty oil spotted glaze produced in Linfen kilns (Shanxi province, AD 1115–1368), *J. Raman Spectrosc.* 53 (2021) 582–592. <https://doi.org/10.1002/jrs.6229>.
- [232]C. Chauffeton, Étude et prospection physico-chimique d'un pigment historique de la Manufacture Nationale de Sèvres
- [233]G.W. Brindley, M. Nakahira, The Kaolinite-Mullite Reaction Series: II Metakaolin, *J. Am. Ceram. Soc.* 42 (1959) 314–318. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1959.tb14315.x>.
- [234]A.K. Chakraborty, D.K. Ghosh, Reexamination of the Kaolinite-to-Mullite Reaction, *J. Am. Ceram. Soc.* 61 (1978) 170–173. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1978.tb09264.x>.
- [235]K. Srikrishna, G. Thomas, R. Martinez, M.P. Corral, S. De Aza, J.S. Moya, Kaolinite-mullite reaction series: a TEM study, *J. Mater. Sci.* 25 (1990) 607–612. <https://doi.org/10.1007/BF00714083>.
- [236]M. Huang, Traduction du Chá Jīng de Lù Yǔ (entre 760 et 780), *Global Tea Hut.* 44 (2015) 31–61.
- [237]TED-Ed, S. Teng, The history of tea - Shunan Teng, 2017. <https://www.youtube.com/watch?v=LaLvVc1sS20>.
- [238]V.H. Mair, E. Hoh, *The True History of Tea*, Thames&Hudson, 2012. [https://books.google.fr/books?id=p1bGDwAAQBAJ&pg=PT75&lpg=PT75&dq=tea+contest%E2%80%9D+\(doucha&source=bl&ots=sBai4oS-qt&sig=ACfU3U3jlrXY_fggIoO3HNwPI5OKiZ873w&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwj7ns6-84XnAhVLrxoKHdXLCU8Q6AEwAHoECAUQAQ#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fr/books?id=p1bGDwAAQBAJ&pg=PT75&lpg=PT75&dq=tea+contest%E2%80%9D+(doucha&source=bl&ots=sBai4oS-qt&sig=ACfU3U3jlrXY_fggIoO3HNwPI5OKiZ873w&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwj7ns6-84XnAhVLrxoKHdXLCU8Q6AEwAHoECAUQAQ#v=onepage&q&f=false).

- [239]H.-Y. Chu, 《茶具圖贊》研究 - abstract en anglais, 興大中文學報. 103 (2014).
- [240]Teasenz, A Tea Poem by Su Shi (Su Dongpo): Simmering Tea with Fresh River Water, (n.d.).
<https://www.teasenz.com/chinese-tea/su-shi-su-dong-po-simmering-tea-dipping-river-water.html>.
- [241]P. Marsone, Chapitre 1 - L'auteur et le Texte, in: Aux origines du Zen, Édition bilingue, commentée et annotée du Kōzen gokoku ron de Eisai (1142-1215), You-Feng, Paris, 2002.
<https://terebess.hu/zen/mesterek/Aux-origines-du-Zen.pdf>.
- [242]S. Iwao, T. Iyanaga, S. Ishii, S. Yoshida, J. Fujimura, M. Fujimura, I. Yoshikawa, T. Akiyama, S. Iyanaga, H. Matsubara, 434. Kissa yōjō-ki, Dictionnaire Historique Du Japon. 12 (1986) 106.
https://www.persee.fr/doc/dhjap_0000-0000_1986_dic_12_1_913_t1_0106_0000_4.

Annexes

Liste des Annexes

L'**Annexe 1 : Introduction à la consommation du thé sous la dynastie Sòng** est une introduction rédigée à la consommation du thé en Chine. Elle se concentre surtout sur l'époque des Sòng et présente de manière succincte les « douchá » ou joutes de thé, pratiquées à cette période, mais évoque également la consommation de cette décoction aux époques antérieures et leurs influences, en particulier sur le Japon

L'**Annexe 2 : Étude de la nomenclature des glaçures noires et brunes dans la littérature spécialisée** présente sous forme de tableau tous les objets ou groupes d'objets considérés dans l'étude de la nomenclature des glaçures noires et brunes. Chaque élément occupe une ligne du tableau. Ils sont présentés dans l'ordre des trois classes établies (glaçures monochromes, à décors abstraits et à décors figuratifs) avec la référence d'où ils sont tirés et les informations principales qui en ont été extraites.

L'**Annexe 3 : Corpus détaillé des échantillons disponibles** liste les échantillons ou fragments d'échantillon disponibles pour être étudiés en France sous forme de tableau, avec en particulier des images individuelles de tous sauf ceux qui étaient uniquement disponibles sous forme de section transverse mise en résine. Elle contient également une carte de la Chine indiquant l'emplacement des fours d'où proviennent les échantillons anciens

L'**Annexe 4 : Compositions élémentaires mesurées par PIXE** détaille les compositions moyennes obtenues par PIXE sur les pâtes (Tableau 19) et les glaçures (Tableau 20) des différents échantillons en ppm.

L'**Annexe 5 : Affinements par la méthode de Rietveld** présente les proportions des phases dans la pâte des différents échantillons (Tableau 21), ainsi que les paramètres de maille de la mullite des pâtes (Tableau 22) et de la phase ϵ -Fe₂O₃ des glaçures (Tableau 23).

Annexe 1 : Introduction à la consommation du thé sous la dynastie Sòng

1) Consommation du thé avant la dynastie Sòng

Le thé est une plante appréciée et consommée depuis la naissance de la civilisation chinoise. Sa découverte est généralement attribuée à Shénnóng [236,237], le « divin laboureur » et herboriste renommé qui fut, d'après plusieurs mythes, rétabli d'une intoxication liée à la recherche de plantes médicinales en consommant du thé. Ce personnage est l'un des trois « Augustes », divinités légendaires qui auraient régné sur le territoire chinois au troisième millénaire avant J.-C., avant la dynastie Xià, première décrite par l'historiographie chinoise.

Consommé en infusion au moins depuis la dynastie Hàn comme le suggère un traité écrit à cette époque par le poète Wáng Bāo [238], sa culture s'est progressivement développée au fil des différentes dynasties jusqu'à devenir un véritable art. Cet art du thé avait des caractéristiques assez différentes d'une époque à l'autre, tant sur la manière de préparer l'infusion que sur les ustensiles à utiliser pour apprécier cette boisson [79].

La première monographie dédiée exclusivement à l'art du thé paraît pendant la deuxième moitié du VIII^e siècle, sous la dynastie Táng. Il s'agit du célèbre Chá Jīng (ou classique du thé) écrit par Lù Yǔ entre les années 760 et 780 [78]. Dans cet ouvrage, il décrit avec précision toutes les informations associées à la consommation du thé, de la culture des théiers, la préparation des feuilles après la récolte jusqu'à la meilleure manière de l'apprécier [236]. Il explique que les feuilles de thé sont conditionnées en gâteaux après leur récolte et leur préparation, lesquels sont ensuite grillés et réduits en poudre. Cette dernière est ensuite infusée dans de l'eau bouillante salée. Lors du service de cette décoction dans le bol, il se forme naturellement un peu de mousse à la surface du breuvage.

A cette époque, Lù Yǔ recommande explicitement pour savourer l'infusion d'utiliser des céramiques à glaçure vert-gris produites dans les fours de Yuè, qui d'après lui font ressortir parfaitement la véritable couleur du thé. Il indique néanmoins que d'autres amateurs préfèrent les glaçures blanches des fours de Xíng [236].

2) Consommation du thé sous les Sòng

Sous la dynastie Sòng, la consommation du thé prend une grande importance dans la société et évolue considérablement par rapport aux pratiques décrites par Lù Yǔ. Tout d'abord, du point de vue du consommateur, cette boisson devient accessible à la majorité de la population, en particulier aux classes moyennes où elle devient très populaire [55]. Dans le même temps, les nouvelles manières de le consommer prennent une dimension sociale forte, avec des jeux et autres rituels contribuant également à sa popularisation [79].

Ces fameux « concours », souvent qualifiés de « dòuchá » (斗茶) [78,79,238], littéralement joutes de thé, sont principalement basés sur la nouvelle méthode de préparation développée à cette époque qui consiste à le fouetter afin d'obtenir à sa surface une mousse blanche épaisse (bien plus

que celle mentionnée par Lù Yǔ) [78,79]. Cette pratique, déjà utilisée avant la dynastie Sòng par les cultivateurs ou officiels du Fújiàn pour tester la qualité de leur thé [78,79,113], a été progressivement adoptée par les consommateurs et les lettrés. Cette adoption a transformé le simple dòuchá en un type de jeu davantage basé plus sur la dextérité que sur la qualité de la boisson [113]. Il semble, pour ce deuxième type de jeu, que différents exercices étaient appréciés successivement à cette époque : d'abord le diǎnchá (点茶), gestes liés à la préparation du thé qui consistent en le fouetter pour obtenir une mousse blanche et homogène qui adhère aux lèvres des bols [79,238], ensuite le fēnchá (分茶) qui repose sur l'utilisation d'une cuillère pour agiter la mousse et y former des dessins [78,79,237]. Ces deux aspects semblent avoir été les principaux jugés au cours des dòuchá de dextérité qui ont rendu l'art du thé véritablement fascinant pour ceux qui le pratiquaient, en particulier les lettrés. Les dòuchá basés sur la qualité et les saveurs du thé quant à eux conduisaient plutôt à une mousse vert foncé [113].

Cet engouement pour le thé fouetté est illustré par la multiplication des traités à ce sujet, les plus connus étant probablement le Chá Lù (ou annales du thé) écrit entre les années 1049-1053 par le calligraphe et fonctionnaire Cài Xiāng qui a servi de référence sur la consommation du thé après sa parution et de base pour les dòuchá de dextérité [78,79,113], le Dà Guān Chá Lùn (ou traité du thé de l'ère Dagan) écrit par l'empereur Huīzōng lui-même en 1107 [78,103] ou encore le Chájù Tú Zàn écrit par le vieil homme Shěnnān en 1269 [239]. Ce mode de consommation est également représenté dans les différents arts, comme par exemple dans la poésie de Sū Shì (1037-1101), qui écrit « l'eau blanche et mousseuse, frémissante, fait tourbillonner des éclats de thé²¹ » dans son poème Jí Jiāng Jiānchá (Thé frémissant avec de l'eau de rivière fraîche) [240].

Cette mode du thé fouetté à la mousse blanche a complètement transformé les choix des couleurs de bols pour savourer le thé. En effet, les glaçures claires recommandées par Lù Yǔ pour révéler la véritable couleur de l'infusion ne contrastent dès lors plus avec la mousse blanche, alors que les glaçures sombres permettent de la sublimer d'après les auteurs anciens [78,79,103]. Ces nouveaux égards envers les glaçures noires promurent fortement les bols noirs et bruns produits dans le Fújiàn, en particulier par les fours de Jiàn qui furent vantés par Cài Xiāng et l'empereur Huīzōng [41,79,103,238]. Ils sont parfaitement adaptés à la consommation des infusions grâce à leur parois épaisses qui gardent le thé chaud tout en évitant de se brûler les doigts et la forme de leur lèvre qui favorise la prise de petites gorgées [45,78].

De plus, les motifs uniques figurants sur la glaçure sont en parfait accord avec les goûts esthétiques de l'époque décrits ci-dessus, en particulier pour l'aspect rustique et "naturel sans artifice" puisqu'ils se forment spontanément au cours de la cuisson [78,79].

3) Influences de l'art du thé Sòng

L'art du thé pratiqué par les Sòng a atteint un sommet esthétique qui a bouleversé son mode de consommation en Chine, cependant il a également conduit à des aberrations comme l'extraction de jus des feuilles de thé pour obtenir une mousse d'une plus grande blancheur lors des dòuchá ce qui faisait perdre au thé son goût et sa couleur d'origine, ou encore la transformation des bols de Jiàn, originellement plutôt rustiques, en produits de luxe accessibles seulement aux lettrés et à la cour

21- Traduction de la version anglaise indiquée sur la page web : « White frothy water, simmering, whirls bits of tea »

impériale, conduisant à la fabrication de contrefaçons. Ces facteurs, combinés au déclin du statut de lettré, ont contribué à l'oubli de cette pratique sous la dynastie Yuán [79].

Bien que disparu avec les Sòng en Chine, cet art unique du thé battu a inspiré de nombreuses autres cultures (Japon, Corée...) qui se sont approprié ces codes et s'en sont servi pour établir leur propre cérémonie du thé [79]. Il était le plus souvent importé par des moines qui l'avait appris lors de pèlerinages en Chine. C'est le cas par exemple du maître zen Eisai (1141-1215), ayant résidé dans des monastères chán des montagnes du Sud de la Chine où les moines buvaient le thé de cette manière quotidiennement. Il rédigea après ses voyages son célèbre *Kissa Yōjōki* (ou *Notes sur l'influence salutaire de l'infusion du thé*) qui contribua fortement à la popularisation de la consommation du thé dans son pays [241,242]. Les moines japonais ont également importé au Japon les bols de Jiàn. Ils y ont gagné une notoriété importante, appréciés par exemple par les shoguns Ashikaga [73,111]. C'est dans ce pays d'ailleurs qu'ils ont pris le nom de « tenmoku » (également orthographié temmoku), en l'honneur de la montagne Tiānmù (Zhèjiāng) où se trouvaient plusieurs de ces temples. Le terme a été utilisé pour la première fois dans un rapport rédigé par Onkei Soyu en 1335 [111].

Annexe 2 : Étude de la nomenclature des glaçures noires et brunes dans la littérature spécialisée

Cette étude se base sur les nomenclatures utilisées pour qualifier les objets, et non les objets en tant que tels. Ainsi certains d'entre eux qui sont présentés dans plusieurs catalogues sous différentes nomenclatures peuvent apparaître à plusieurs reprises dans le tableau.

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Monochromes	Glaçure granuleuse unie opaque brillante	Couleur brun foncé	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet FSC-P-147	Black iron glaze / White slip under glaze	Sòng du Sud	Liúlíchǎng (Sìchūān)	Liulichang	Tesson
Monochromes	Glaçure granuleuse unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne British Museum Objet 1937,0716.52	<i>Pas de description spécifique</i>	Jīn	(Chine)	Henan	Bol
Monochromes	Glaçure granuleuse unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet FSC-P-4200	<i>Pas de description spécifique</i>	Sòng	(Chine)	Jian	Tesson
Monochromes	Glaçure granuleuse unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet FSC-P-865	Iron glaze	Sòng	Shuǐjí, Jiàn (Fújiàn)	Jian	Tesson
Monochromes	Glaçure granuleuse unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet FSC-P-880	Iron glaze	Sòng	Shuǐjí, Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Monochromes	Glaçure sombre avec défauts de cuisson		Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1914.112	Misfired iron glaze	Sòng	(Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Monochromes	Glaçure sombre avec défauts de cuisson		Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1914.51	Underfired iron glaze	Sòng	(Fújiàn)	Jian	Bol à thé

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Monochromes	Glaçure sombre avec défauts de cuisson		Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1915.86	Underfired iron glaze	Sòng	(Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Monochromes	Glaçure sombre avec défauts de cuisson		Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1914.113	Underfired iron glaze	Sòng du Nord	(Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Monochromes	Glaçure sombre avec défauts de cuisson		Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1914.116	Iron glaze	Sòng du Nord	(Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Monochromes	Glaçure sombre avec défauts de cuisson		Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet FSC-P-152	Iron glaze / White slip under glaze	Sòng du Sud	Liúlíchǎng ? (Sìchuān)	Liulichang	Assiette
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Expo. Singapour, 1983 Objet 170	Light brown glaze / White slip under glaze	Inconnue	Inconnue		Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1917.226	Red slip under iron-yellow lead-silicate glaze	Jīn	(Chine)		Bouteille
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Coll. en ligne V&A Museum Objet FE.19-1989	Brown glaze	Jīn	(Chine du Nord)	Blackware	Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Coll. exposées Musée Guimet Un des objets MA732, MA4287, MA4296	Couverte noire, brune et tachetée	Jīn	(Chine du Nord)		Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1909.311	Russet iron glaze	Sòng	Shuǐjí, Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Longsdorf Collection, 2013 Objet 51	Brown glaze / Russet glaze	Sòng	(Chine du Nord)	Cizhou	Bol à thé

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Longsdorf Collection, 2013 Objet 52	Russet glaze / Lustrous dark reddish-brown glaze	Sòng	Inconnue		Doseur à grains
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Bulletin Baur 75, 2015 Figure 14	Couverte rousse	Sòng du Nord	Dìng (Héběi)		Coupe
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1911.367	Iron glaze	Sòng du Nord	Dìng (Héběi)	Dìng	Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.603&A-1918	Brown glaze / Purple Ding / Aubergine-brown colour	Sòng du Nord	Dìng (Héběi)		Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.925-1935	Rust-brown glaze	Sòng du Nord	(Chine du Nord)		Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Coll. exposées Musée Guimet Objets MA4285 et 4288	Couverte brune	Sòng du Nord	Dìng (Héběi)		Coupes
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Expo. Japon, 1999 Objet 16	Red-brown glaze	Sòng du Nord	Yàozhōu (Shǎnxī)		Pot
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Hougron, 2015 Figure page 65	Couverte type Ding rouge	Sòng du Nord	Inconnue		Bol à thé
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Kwan Coll., 1994 Objet 23	Persimmon glaze	Sòng du Nord	Dìng (Héběi)		Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Kwan Coll., 1994 Objet 86	Persimmon glaze	Sòng du Nord	Yàozhōu (Shǎnxī)		Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Linyushanren Coll., 2015 Objet 2819	Persimmon glaze / Lustrous rust-brown glaze	Sòng du Nord	Dìng ? (Héběi)	Dìng	Assiette

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Longsdorf Collection, 2013 Objet 49	Russet glaze / Rich reddish-brown glaze	Sòng du Nord	Inconnue	Ding	Assiette
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Longsdorf Collection, 2013 Objet 60	Persimmon-brown glaze / Russet glaze	Sòng du Nord	Inconnue	Cizhou	Bol à thé
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Mowry et al, 1986 Cat. 13	Russet glaze / Russet-surfaced dark brown glaze	Sòng du Nord	Jiàncí, Dìng (Héběi)	Russet Ding	Sous-tasse
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Mowry et al, 1986 Cat. 20	Russet-surfaced dark brown glaze	Sòng du Nord	Huángpǔ, Yàozhōu (Shǎnxī)	Russet Yaozhou	Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Mowry et al, 1986 Cat.12	Russet glaze / Mottled russet- surfaced dark brown glaze	Sòng du Nord	Jiàncí, Dìng (Héběi)	Russet Ding	Sous-tasse
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Mowry et al, 1986 Cat.14	Russet glaze / Russet-surfaced dark brown glaze	Sòng du Nord	Jiàncí, Dìng (Héběi)	Russet Ding	Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Mowry et al, 1986 Cat.24	Russet glaze / Russet-surfaced dark brown glaze	Sòng du Nord	Inconnue	Cizhou	Bouteille
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Mowry et al, 1986 Cat.25	Russet glaze / Russet-surfaced dark brown glaze	Sòng du Nord	Inconnue	Cizhou	Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Mowry et al, 1986 Cat.26	Russet glaze / Russet-surfaced dark brown glaze	Sòng du Nord	Inconnue	Cizhou	Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Mowry et Rotondo, 2000 Objet 26	Russet glaze	Sòng du Nord	Cízhōu (Héběi)		Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Priestley & Ferraro, 2014 Objet 1	Persimmon glaze	Sòng du Nord	(Chine du Nord)		Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Priestley & Ferraro, 2014 Objet 14	Soy-sauce brown glaze	Sòng du Nord	Dìng (Héběi)		Porte pinceau

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Expo. Singapour, 1983 Objet 39	“Golden celadon” glaze	Sòng du Sud	Lóngquán (Zhèjiāng)		Assiette
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Expo. Singapour, 1983 Objet 50	“Golden celadon” glaze / Golden-brown glaze	Sòng du Sud	Lóngquán (Zhèjiāng)		Vases
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Tregear, 1982 Figure 265	Kaki-type glaze / Couverte brun kaki	Sòng du Sud Ou Yuán	Gànzhōu (Jiāngxī)		Doseur à grains
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Mowry et al, 1986 Cat. 110	Russet-surfaced dark brown glaze	Sòng du Sud ou Yuán	Qǐlǐ (Jiāngxī)	Ganzhou	Doseur à grains
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Beauty of Song Ceram., 2016 Objet 23	Kaki-brown glaze	Sòng ou Jīn	Dìng (Héběi)		Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Bulletin Baur 73, 2013 Figure 10	Roux lustré / Ding rouges ou pourpres / Bronze pourpre Couleur de soja / Couverte kaki / Couleur caramel	Sòng ou Jīn	Dìng (Héběi)		Coupe et couvercle
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Bulletin Baur 73, 2013 Figure 11	Brun rougeâtre à reflet métallique	Sòng ou Jīn	(Chine du Nord)		Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Bulletin Baur 75, 2015 Figure 15	Couverte rousse lustrée	Sòng ou Jīn	(Chine du Nord)		Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Expo. Japon, 1999 Objet 40	Red-brown glaze	Sòng ou Jīn	Dìng (Héběi)		Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Expo. Japon, 1999 Objet 41	Red-brown glaze	Sòng ou Jīn	Dìng (Héběi)		Vase
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Linyushanren Coll., 2015 Objet 2822	Persimmon glaze / Russet-brown glaze	Sòng ou Jīn	Cízhōu (Héběi)		Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Mowry et al, 1986 Cat.27	Russet glaze / Russet-surfaced dark brown glaze	Sòng ou Jīn	Inconnue	Cizhou	Jarres

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Mowry et Rotondo, 2000 Objet 27	Russet glaze	Sòng ou Jīn	Cízhōu (Héběi)		Pot
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Mowry et Rotondo, 2000 Objet 28	Russet glaze	Sòng ou Jīn	Cízhōu (Héběi)		Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur brun « sauce »	Priestley & Ferraro, 2014 Objet 2	Persimmon-brown glaze	Sòng ou Jīn	Yàozhōu ? (Shǎnxī)		Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Mowry et al, 1986 Cat.28	Dark brown glaze	5 Dyn. ou Sòng	Inconnue	Cizhou	Verseuse
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Expo. Singapour, 1983 Objet 152	Black, viscous glaze flushed with gold-yellow	Inconnue	(Hénán ou Zhèjiāng)		Verseuse
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Expo. Singapour, 1983 Objet 153	Glossy black glaze, with yellow suffusions	Inconnue	(Hénán ?)		Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Expo. Singapour, 1983 Objet 167	Tea-dust glaze	Inconnue	Lǚshān ? (Hénán)		Brûleur à Encens
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3855	Iron glaze	Jīn	(Shǎnxī)	Xibo	Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.39-1965	Black glaze / Lustrous glaze	Jīn	(Chine du Nord)		Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.40-1965	Black glaze	Jīn	(Chine du Nord)		Bouteille
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.69-1939	Shiny brown glaze	Jīn	(Chine du Nord)		Vase

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Kwan Coll., 1994 Objet 159	Black glaze	Jīn	(Hénán)	Cizhou	Vase
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet FSC-P-870	Iron glaze	Sòng	Shuǐjí, Jiàn (Fújiàn)	Jian	Tesson
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3512	Iron glaze	Sòng	(Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Expo. Singapour, 1983 Objet 146	Viscous glossy brown-black glaze	Sòng	(Hénán ?)		Verseuse
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Mowry et al, 1986 Cat. 82	Silvery brown hare's-fur markings / Dark brown glaze / Markings in iron oxide	Sòng	Shuǐjí, Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Bulletin Baur 73, 2013 Figure 9	Beau noir brillant, proche de la couleur des laques	Sòng du Nord	(Chine du Nord)		Coupe
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1909.390	Iron glaze	Sòng du Nord	(Chine)	Cizhou	Figurine
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1916.600	Iron glaze	Sòng du Nord	(Chine)	Cizhou	Sifflet
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1917.220	White slip under iron glaze	Sòng du Nord	(Chine)	Cizhou	Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne V&A Museum Objet CIRC.49-1930	Black glaze	Sòng du Nord	(Chine du Nord)		Gourde
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Kwan Coll., 1994 Objet 154	Black glaze	Sòng du Nord	(Hénán)	Cizhou	Vase

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Longsdorf Collection, 2013 Objet 54	Brown glaze / Very dark brown-black glaze thinning to rust-brown	Sòng du Nord	Cízhōu (Héběi)		Brûleur à encens
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Mowry et al, 1986 Cat. 17	Black glaze / Dark brown glaze	Sòng du Nord	Jiàncí, Dìng (Héběi)	Black Ding	Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Mowry et al, 1986 Cat. 29	Black glaze / Dark brown glaze	Sòng du Nord	Inconnue	Cizhou	Tasse et sous- tasse
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Mowry et al, 1986 Cat. 30	Black glaze / Dark brown glaze	Sòng du Nord	Inconnue	Cizhou	Brûleur à encens / Lampe
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Mowry et al, 1986 Cat. 33	Russet flecks / Dark brown glaze / Markings in overglaze iron oxide	Sòng du Nord	Inconnue	Cizhou	Bouteille
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Priestley & Ferraro, 2014 Objet 3	Black glaze	Sòng du Nord	(Chine du Nord)		Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet FSC-P-148	Very dark / Black iron glaze / White slip under glaze	Sòng du Sud	(Sìchuān)	Tenmoku	Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S1999.120.12a-b	Iron glaze	Sòng du Sud	(Chine du Sud-Est)		Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Expo. Singapour, 1983 Objet 160	Intense black glaze suffused with blue	Sòng du Sud	Jízhōu ? (Jiāngxī)	Jian	Bol a thé
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Hougron, 2015 Figure page 52	<i>Pas de description spécifique</i>	Sòng du Sud	(Fújiàn)	Jian	Bol et casette
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Kwan Coll., 1994 Objet 156	Black glaze	Sòng du Sud	(Hénán)	Cizhou	Vase et couvercle

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1991.86	Iron glaze	Sòng du Sud ou Yuán	(Fújiàn)	Cizao	Vase
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Mowry et al, 1986 Cat. 109	Dark brown glaze	Sòng du Sud ou Yuán	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Brûleur à Encens
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Bulletin Baur 75, 2015 Figure 13	Couverte noire	Sòng ou Jīn	Dìng (Héběi)		Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3513	Brown glaze	Sòng ou Jīn	Péngchéng (Héběi)	Cizhou	Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3856a-b	Iron glaze	Sòng ou Jīn	Péngchéng (Héběi)	Cizhou	Bol et couvercle
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Mowry et al, 1986 Cat. 4	Dark brown glaze	Táng	Inconnue		Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Mowry et al, 1986 Cat. 5	Dark brown glaze	Táng	Inconnue		Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Mowry et al, 1986 Cat. 6	Tea-dust glaze / Speckled golden brown glaze	Táng	Yàozhōu (Shǎnxī)	Huangpu	Verseuse
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Mowry et al, 1986 Cat. 7	Black glaze / Dark brown glaze	Táng	Yàozhōu (Shǎnxī)	Huangpu Blackware	Crachoir
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne British Museum Objet 1924,0115.2.a-bd	Brown and cream Cizhou / Coarse black sherd / Turquoise and black Cizhou	Táng à Míng	(Chine)	Cizhou	Tessons
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1909.308	Iron glaze	Yuán	(Chine)	Cizhou	Vase
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Tregear, 1982 Figure 268	Black glaze / Couverte noire	Yuán	Gànzhōu (Jiāngxī)		Doseur à grains

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante	Couleur noire	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1901.89a-b	Iron glaze	Yuán ou Míng	(Fújiàn ?)		Pot à thé avec Couvercle en ivoire
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur brun « sauce » et intérieur blanc	Tregear, 1982 Figure 40	Dull-rust-coloured glaze / Couverte noire sur un décor peint en oxyde de fer	Sòng du Nord	Dìng ? (Héběi)		Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et bordure blanche	Expo. Singapour, 1983 Objet 147	Brown / Black	Inconnue	(Hénán ou Héběi)	Cizhou	Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et bordure blanche	Coll. en ligne V&A Museum Objet FE.175-1974	Rich black glaze	Sòng	(Chine du Nord)		Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et bordure blanche	Mowry et al, 1986 Cat. 77	Yellow hare's-fur markings / Dark brown glaze / Markings in iron oxide	Sòng	Shuǐjí, Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et bordure blanche	Mowry et al, 1986 Cat. 78	Brown hare's-fur markings / Dark brown glaze /arkings in iron oxide	Sòng	Shuǐjí, Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et bordure blanche	Priestley & Ferraro, 2014 Objet 6	Black glaze / Glossy very dark brown glaze	Sòng	(Chine du Nord)		Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et bordure blanche	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1915.71	Iron glaze / Iron wash	Sòng du Nord	(Chine du Nord)	Cizhou	Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et bordure blanche	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3780	<i>Pas de description spécifique</i>	Sòng du Nord	(Chine)	Cizhou	Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et bordure blanche	Longsdorf Collection, 2013 Objet 61	Black glaze with white splip / Very dark brown-black glaze with glossy surface	Sòng du Nord	Inconnue	Cizhou	Bol

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et bordure blanche	Mowry et al, 1986 Cat. 31	Black glaze and white rim / Dark brown glaze	Sòng du Nord	Inconnue	Cizhou	Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et bordure blanche	Mowry et al, 1986 Cat. 32	Black glaze and white rim / Dark brown glaze	Sòng du Nord	Inconnue	Cizhou	Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et bordure blanche	Expo. Japon, 1999 Objet 82	Yuteki (oil spot) temmoku / Black glaze covered with silvery spots	Sòng du Sud	Inconnue	Temmoku	Bol à thé
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et bordure blanche	Expo. Japon, 1999 Objet 83	Yuteki (oil spot) temmoku / Black glaze covered with silvery spots	Sòng du Sud	Inconnue	Temmoku	Bol à thé
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et bordure blanche	Expo. Singapour, 1983 Objet 159	Black glaze suffused with brown	Sòng du Sud	Jízhōu ? (Jiāngxī)	Jian	Bol a thé
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et bordure blanche	Longsdorf Collection, 2013 Objet 56	Brown glaze / Mottled dark brown glaze	Sòng du Sud	Inconnue		Bol à thé
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et bordure blanche	Coll. exposées Musée Guimet Objet MA4115, MA4129	Couverte noire et ivoire	Sòng ou Jīn	(Hénán ou Shānxī)		Bols
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et intérieur blanc	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.567-1920	Black glaze and white slip	Sòng du Nord	(Chine du Nord)		Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et intérieur blanc	Kwan Coll., 1994 Objet 122	Black and yellow glaze	Sòng du Sud	Ráozhōu (Jiāngxī)		Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et intérieur blanc	Coll. en ligne British Museum Objet 1924,0112.9	White slip and black glaze	Sòng ou Jīn	Jùlù (Héběi)	Cizhou	Bol

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Monochromes	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et intérieur blanc	Coll. exposées Musée Guimet Objet MA4149	Couverte noire avec ouverture à couverte blanche	Sòng ou Jīn	(Hénán ou Shānxī)		Vase
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Expo. Singapour, 1983 Objet 162	Black glaze / Brown-black, crackled, viscous glaze	5 Dyn. Ou Sòng	Inconnue	Deqing	Verseuse
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Expo. Singapour, 1983 Objet 149	Intense black glaze	Inconnue	(Hénán ?)		Bouteille
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Expo. Singapour, 1983 Objet 150	Intense black glaze	Inconnue	(Hénán ?)		Verseuse
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Coll. en ligne V&A Museum Objet CIRC.50-1930	Brown glaze / Chocolate brown glaze	Jīn	(Chine du Nord)	Blackware	Gourde
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3393	Jun glaze* *Probable erreur de saisie sur le site	Jīn ou Yuán	(Hénán)	Jun	Assiette
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Coll. exposées Musée Guimet Objet EO2996	<i>Pas de description spécifique</i>	Míng	(Chine)		Pot à thé avec Couvercle en ivoire
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3519	Iron glaze	Sòng	(Chine)	Cizhou	Pivot de potier
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.601-1918	Black glaze	Sòng	(Chine)		Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Coll. en ligne British Museum Objet MAS.821.a	Brown glaze	Sòng ?	Dūnhuáng (Gānsù)		Tesson
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1909.383	Iron glaze and white slip under clear glaze	Sòng du Nord	(Chine)	Cizhou	Vase

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3924	Iron glaze	Sòng du Nord	(Húnán)	Cizhou	Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Expo. Singapour, 1983 Objet 148	Intense black glaze over white slip / Parts blue-black	Sòng du Nord	(Hénán ?)		Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Expo. Singapour, 1983 Objet 151	Brown-black glaze	Sòng du Nord	Inconnue	Cizhou	Bouteille
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Mowry et al, 1986 Cat. 23	Dark brown glaze over trailed white-slip ribs	Sòng du Nord	Huángpǔ, Yàozhōu ? (Shǎnxī)		Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Mowry et al, 1986 Cat.18	Tea-dust glaze / Brownish green tea-dust glaze	Sòng du Nord	Jiàncí, Dìng (Héběi)	Tea-Dust Dìng	Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3463a-b	Iron glaze	Sòng du Sud	(Chine)		Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.600-1918	Brown glaze	Sòng du Sud	Cízhōu (Héběi)	Cizhou	Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.605-1918	Black glaze painted in cream slip	Sòng du Sud Ou Yuán	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol à thé
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Coll. en ligne V&A Museum Objet FE.100-1975	Dark brown glaze / Chocolate- brown glaze	Sòng du Sud Ou Yuán	(Chine du Sud)	Blackware	Jarrelet
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1916.230a-c	Iron glaze	Sòng du Sud à Míng	(Guǎngdōng)		Jarre funéraire

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objets S2005.31, S2005.32, S2005.34	Iron glaze / Fly-ash glaze	Sòng du Sud ou Yuán	Cízào (Fújiàn)	Cizao	Vase
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Mowry et Rotondo, 2000 Objet 36	Tea-dust glaze	Sòng ou Jīn	Cízhōu (Héběi)		Pot
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Expo. Singapour, 1983 Objet 163	Brown-black glaze	Sòng ou Yuán	(Fújiàn ?)		Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Coll. en ligne British Museum Objet 1936,1012.215	Black iron glaze	Táng	Inconnue		Verseuse
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Coll. exposées Musée Guimet Objet MA6057	Couverte brune	Táng	(Chine du Nord)		Verseuse
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Mowry et al, 1986 Cat. 3	Dark brown glaze over appliqué décoration	Táng	Inconnue		Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Wu, 2001 Pages 46-47	Brownish black glaze	Táng	(Chine du Nord)		Verseuse
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Wu, 2001 Pages 50-51	Greenish-brown tea dust glaze / Glaçure tachetée (speckled) (chayemo en chinois)	Táng	(Chine du Nord)	Northern	Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3933	Celadon glaze	Táng, 5 Dyn. ou Sòng	(Chine)		Jarre
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brun foncé ou noir	Coll. en ligne British Museum Objet 1927,0217.1	<i>Pas de description spécifique</i>	Yuán	(Chine)	Cizhou	Bouteille
Monochromes	Glaçure unie opaque mate	Couleur brune	Expo. Singapour, 1983 Objet 168	Tea-dust glaze	Jīn ?	Lǚshān ? (Hénán)		Vase

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Monochromes	Glaçure unie opaque mate à décor blanc	Couleur brun foncé et bordure blanche	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3516	Iron and white glazes	Sòng du Sud	(Jiāngxī)	Jizhou	Bol
Monochromes	Glaçure unie opaque mate à décor blanc	Couleur brun foncé et bordure blanche	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3659	Iron and ash glazes	Sòng du Sud	(Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé
Monochromes	Glaçure unie opaque mate à décor blanc	Couleur brun foncé et bordure blanche	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3969	Iron and white glazes	Sòng du Sud	(Jiāngxī)	Jizhou	Bol
Monochromes	Glaçure unie translucide	Couleur brun clair	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.28-1933	Brown-coloured lead glaze / Amber-coloured glaze	Liáo	(Territoire Liáo)		Bouteille
Monochromes	Glaçure unie translucide	Couleur brun clair	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet FSC-P-163	White slip under translucent brown glaze	Sòng du Sud	(Sìchuān)		Bol
Monochromes	Glaçure unie translucide	Couleur brun clair	Expo. Singapour, 1983 Objet 40	“Golden celadon” glaze / Golden- brown glaze	Sòng du Sud	Lóngquán (Zhèjiāng)		Assiette
Monochromes	Glaçure unie translucide	Couleur brun clair	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3590a-b	Iron glaze	Sòng du Sud ou Yuán	(Chine)		Boîte
Monochromes	Glaçure unie translucide	Couleur brun clair	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3497	Iron glaze	Sòng ou Jīn	(Chine)	Ding-related	Jarre
Monochromes	Glaçure unie translucide	Couleur brun clair	Expo. Japon, 1999 Objet 113	Brown glaze	Sòng ou Liáo	Inconnue		Verseuse
Monochromes	Glaçure unie translucide	Couleur brun foncé	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.342-1921	Black glaze	Jīn	(Chine du Nord)	Blackware	Vase
Monochromes	Glaçure unie translucide	Couleur brun foncé	Mowry et al, 1986 Cat. 19	Dark olive brown glaze	Jīn	Jiàncí, Dìng (Héběi)	Dark brown Dìng	Assiette

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Monochromes	Glaçure unie translucide	Couleur brun foncé	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.103-1913	Design of brown spots	Liáo	(Territoire Liáo)		Gourde
Monochromes	Glaçure unie translucide	Couleur brun foncé	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3935	Iron glaze	Sòng du Nord	(Shǎnxī)	Cizhou	Récipient
Monochromes	Glaçure unie translucide	Couleur brun foncé	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet FSC-P-115	Oxidized celadon glaze	Sòng du Sud	(Jiāngxī)	Longquan	Tesson
Monochromes	Glaçure unie translucide	Couleur brun foncé	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet FSC-P-159	Iron glaze, white slip under clear glaze	Sòng du Sud	Liúlíchǎng (Sìchuān)	Liulichang	Assiette
Monochromes	Glaçure unie translucide	Couleur brun foncé	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.4047	Iron glaze	Sòng du Sud ou Yuán	(Fújiàn)		Urinoir
Monochromes	Glaçure unie translucide	Couleur brun foncé	Mowry et al, 1986 Cat. 2	Russet-skinned dark brown glaze	Suí ou Táng	Inconnue		Jarre
Monochromes	Glaçure unie translucide	Couleur brun foncé	Coll. en ligne British Museum Série de tessons 2007,6001	Painted decoration	Táng ?	Chángshā (Húnán)		Tessons
Monochromes	Glaçure unie translucide	Couleur brun foncé	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3796	Iron-brown glaze	Yuán	(Chine)	Cizhou	Vase
Monochromes	Glaçure unie translucide à décor blanc	Couleur brun foncé et bordure blanche	Kwan Coll., 1994 Objet 26	Black glaze	Jīn	Dìng (Héběi)		Bol
Monochromes	Glaçure unie translucide à décor blanc	Couleur brun foncé et bordure blanche	Coll. en ligne British Museum Objet 1938,0524.108	Iron-brown glaze	Sòng	(Shǎnxī)		Bol

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Autre	Glaçure brun beige piqueté de noir	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3105	Iron glaze	Sòng	(Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Autre	Glaçure brun beige piqueté de noir	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3663	Iron glaze	Sòng	(Chine)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Pierson, 2003 Figure 9	Hare's fur	Inconnue	Jiàn ? (Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Besse et Amon, 2004 Figure 5	Couverte brune fourrure de lièvre / Couverte brun-noir veinée de stries chamois	Sòng	Jiàn (Fújiàn)		Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Bulletin Baur 73, 2013 Figure 13	Irisation	Sòng	Jiàn (Fújiàn)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. Baur, 1994 Figure 7	Black glaze with iridescent markings	Sòng	Jiàn (Fújiàn)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne British Museum Objet 1938,0524.11	Hare's fur markings	Sòng	Jiàn (Fújiàn)		Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne British Museum Objet 1973,0726.262	Hare's fur markings / Black glaze	Sòng	(Fújiàn)		Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1897.49	Iron glaze	Sòng	Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1911.360	Iron glaze	Sòng	Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol à thé

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1913.39	Iron glaze	Sòng	(Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1914.111	Iron glaze	Sòng	(Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1979.40	Iron glaze	Sòng	(Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet FSC-P-2631	<i>Pas de description spécifique</i>	Sòng	(Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet FSC-P-4250	<i>Pas de description spécifique</i>	Sòng	(Fújiàn)	Jian	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet FSC-P-860	Iron glaze	Sòng	Shuǐjí, Jiàn (Fújiàn)	Jian	Tesson
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet FSC-P-863	Iron glaze	Sòng	Shuǐjí, Jiàn (Fújiàn)	Jian	Tesson
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet FSC-P-864	Iron glaze	Sòng	Shuǐjí, Jiàn (Fújiàn)	Jian	Tesson
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet FSC-P-867	Iron glaze	Sòng	Shuǐjí, Jiàn (Fújiàn)	Jian	Tesson
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet FSC-P-874	Iron glaze	Sòng	Shuǐjí, Jiàn (Fújiàn)	Jian	Tesson

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet FSC-P-881	Iron glaze	Sòng	Shuǐjí, Jiàn (Fújiàn)	Jian	Tesson
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet FSC-P-883	Iron glaze	Sòng	(Chine)	Jian	Bols et casette
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3104	Iron glaze	Sòng	(Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3966	Iron glaze	Sòng	(Chine)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. exposées Musée Guimet Deux des objets MA4116, MA4119, MA4124, MA4294	Couverte grise ou brune / écailles de tortue / fourrure de lièvre	Sòng	Jiàn ou Jízhōu (Fújiàn ou Jiāngxī)		Bols
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. exposées Musée Guimet Trois des objets EO2926, EO2181, MA2143 et MA4104	Couverte grise ou brune / écailles de tortue / fourrure de lièvre	Sòng	Jiàn ou Jízhōu (Fújiàn ou Jiāngxī)		Bols
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Expo. Singapour, 1983 Objet 154	Viscous brown-black glaze / hare- fur effect	Sòng	(Nord du Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Hobson, 1915 Plate 42, Figure 2	Purplish black glaze shot with golden brown	Sòng	Jiàn (Fújiàn)	Temmoku	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Hougron, 2015 Figure page 52	Poil de lièvre	Sòng	Jiàn (Fújiàn)	Temmoku	Bol à thé

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Hougron, 2015 Figure page 54	Couverte métallique mixte fourrure de lièvre et gouttes d'huile	Sòng	Inconnue		Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Mowry et al, 1986 Cat. 76	Brown hare's-fur markings / Dark brown glaze / Markings in iron oxide	Sòng	Shuǐjí, Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Mowry et al, 1986 Cat. 79	Russet hare's-fur markings / Dark brown glaze / Markings in iron oxyde	Sòng	Shuǐjí, Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Mowry et al, 1986 Cat. 80	Russet hare's-fur markings / Dark brown glaze / Markings in iron oxyde	Sòng	Shuǐjí, Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Mowry et al, 1986 Cat. 81	Silvery brown hare's-fur markings / Dark brown glaze / Markings in iron oxide	Sòng	Shuǐjí, Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Mowry et al, 1986 Cat. 83	Brownish Silver hare's-fur markings / Dark brown glaze / Markings in iron oxide	Sòng	Shuǐjí, Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Mowry et al, 1986 Cat. 84	Hare's-fur markings / Dark brown glaze / Decoration painted in overglaze iron oxide	Sòng	Shuǐjí, Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Priestley & Ferraro, 2014 Objet 7	Dark-brown Hare's Fur	Sòng	Jiàn (Fújiàn)		Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Tregear, 1982 Figure 274	Glossy black and kaki-red glazes / Hare's fur / Deux couvertes : noire et brillante et rougeâtre ou kaki	Sòng	(Hénán ou Shānxī)	Northern temmoku	Bol à thé

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Wu, 2001 Pages 72-73	Hare's fur glaze / Riche glaçure noire effet hare's fur	Sòng	Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Bulletin Baur 75, 2015 Figure 22	Irisation	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne British Museum Objet 1937,0716.50	Hare's fur markings / Streaked iron-black glaze	Sòng du Sud	Shuǐjí (Fújiàn)		Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne British Museum Objet 1947,0418.3	Black tenmoku glaze	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne British Museum Objet 1947,0712.142	Rust colour on black / Hare's fur	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne British Museum Objet 1991,1028.3	Hare's fur	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1952.9	Black iron glaze, hare's fur texture	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3968	Iron glaze	Sòng du Sud	(Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne V&A Museum C.9-1928	Black glaze / Fine streaks hare's- fur	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)		Bol à thé

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Expo. Japon, 1999 Objet 78	Nogime temmoku / Blackish hare's fur glaze	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)	Temmoku	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Fris-Larrouy, 1999 Objet 71.8.3	Couverte brune fourrure de lièvre	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Kwan Coll., 1994 Objet 165	Hare's fur glaze	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Kwan Coll., 1994 Objet 166	Hare's fur glaze	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Kwan Coll., 1994 Objet 167	Hare's fur glaze	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Linyushanren Coll., 2015 Objet 2820	Lustrous black glaze streaked with iridescent Hare's fur / Streaked hare's fur markings with iridescent sheen	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)		Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Tregear, 1982 Figure 257	Thick black and brown hare's fur glaze / Couvertes épaisses noires et brunes, genre fourrure de lièvre	Sòng du Sud	Jiàn ou Chóngān (Fújiàn)	Temmoku	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1902.187	Iron glaze	Sòng du Sud ou Yuán	Cháyáng (Fújiàn)	Jian	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1911.371	Iron glaze	Sòng du Sud ou Yuán	Cháyáng (Fújiàn)	Jian	Bol à thé

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1911.372	Two layers of iron glaze	Sòng du Sud ou Yuán	Cháyáng (Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes ou brun-argenté sur tout le bol	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3852	Iron glaze	Sòng du Sud ou Yuán	(Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes sur les lèvres uniquement	Expo. Singapour, 1983 Objet 156	Viscous brown-black glaze suffused with dark-blue hare-fur	Inconnue	(Nord du Fújiàn)	Jian	Bol a thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes sur les lèvres uniquement	Expo. Singapour, 1983 Objet 157	Black glaze suffused with traces of blue and brown	Inconnue	(Hénán ?)	Jian	Bol a thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes sur les lèvres uniquement	Expo. Singapour, 1983 Objet 158	Black glaze suffused with brown streaks	Inconnue	(Hénán ?)	Jian	Bol a thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes sur les lèvres uniquement	Coll. exposées Musée Guimet Un des objets MA732, MA4287, MA4297	Couverte noire, brune et tachetée	Jīn	(Chine du Nord)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes sur les lèvres uniquement	Mowry et al, 1986 Cat. 47	Large russet splashes / Hare's fur ground / Dark brown glaze / Markings in overglaze iron oxide	Jīn	Inconnue	Cizhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes sur les lèvres uniquement	Coll. en ligne British Museum Objet 1973,0726.263	Hare's fur markings / Black glaze	Sòng	(Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes sur les lèvres uniquement	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3510	Iron glaze	Sòng	(Fújiàn)	Jian	Bol à thé

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes sur les lèvres uniquement	Expo. Singapour, 1983 Objet 155	Viscous brown-black glaze / Dark-blue hare-fur pattern	Sòng	(Nord du Fújiàn)	Jian	Bol a thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes sur les lèvres uniquement	Longsdorf Collection, 2013 Objet 40	Very dark brown-black glaze suffused with pattern of yellowish-brown hare's fur highlights	Sòng	Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes sur les lèvres uniquement	Longsdorf Collection, 2013 Objet 41	Hare's fur glaze / Very dark brown-black glaze / Iridescent silvery hare's fur streaks	Sòng	Jiàn (Fújiàn)		Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes sur les lèvres uniquement	Expo. Japon, 1999 Objet 84	Iron-black glaze	Sòng du Nord	Inconnue		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes sur les lèvres uniquement	Coll. en ligne British Museum Objet 1947,0712.140	Hare's fur markings / Black glaze	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes sur les lèvres uniquement	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1956.24	Painted gold decoration / Iron glaze and gold pigment	Sòng du Sud	Yulinding, (Fújiàn)		Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes sur les lèvres uniquement	Kwan Coll., 1994 Objet 168	Hare's fur glaze	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes sur les lèvres uniquement	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1911.355	Ash and iron glaze	Sòng du Sud ou Yuán	Cháyáng (Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures brunes sur les lèvres uniquement	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1911.369	Iron glaze	Sòng du Sud ou Yuán	Cháyáng (Fújiàn)	Jian	Bol à thé

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures cramoisiées sur fond brun « sauce »	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1907.523	Iron glaze	Sòng	Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Coulures cramoisiées sur fond brun « sauce »	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3964	Iron glaze	Sòng	(Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à coulures	Photographie de qualité insuffisante	Mowry et al, 1986 Figure 3	Ash glaze	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)	Haikatsugi temmoku	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à décor à la feuille métallique		Longsdorf Collection, 2013 Objet 39	Black glaze / Silver hare's fur decoration Glossy black glaze / Pattern of hare's fur painted in silver	Sòng	Inconnue		Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à décor à la feuille métallique		Kwan Coll., 1994 Objet 169	Imitated hare's fur painted in gold	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures argentées	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.838&A-1936	Brown-black glaze / Oil-spot markings / Spotted with lustrous silvery stars	Jīn	(Chine du Nord)	Blackware	Jarre et couvercle
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures argentées	Coll. en ligne V&A Museum Objet CIRC.113-1938	Black oil spot glaze	Jīn	(Chine du Nord)	Blackware	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures argentées	Kwan Coll., 1994 Objet 158	Black glaze and oil spot	Jīn	(Hénán)	Cizhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures argentées	Mowry et al, 1986 Cat. 43 a&b	Silver oil-spot decorations / Dark brown glaze / Markings in overglaze iron oxide	Jīn	Huáirén (Shānxī)	Cizhou	Bols

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures argentées	Mowry et al, 1986 Cat. 44	Silver splashes / Ground of silver oil spots / Dark brown glaze / Markings in overglaze iron oxide	Jīn	Huáirén (Shānxī)	Cizhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures argentées	Mowry et al, 1986 Cat. 46	Silver splashes against ground of silver oil-spot / Dark brown ware	Jīn	Inconnue	Cizhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures argentées	Coll. exposées Musée Guimet Deux des objets MA4116, MA4119, MA4124, MA4294	Couverte grise ou brune / écailles de tortue / fourrure de lièvre	Sòng	Jiàn ou Jízhōu (Fújiàn ou Jiāngxī)		Bols
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures argentées	Mowry et al, 1986 Cat. 85	Silver oil-spot markings / Dark brown glaze / Markings in iron oxide	Sòng	Shuǐjí, Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures argentées	Expo. Japon, 1999 Objet 76	Yuteki (oil spot) temmoku / Black glaze covered with silvery spots	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)	Temmoku	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures argentées	Tregear, 1982 Figure 273	Black oil-spot glaze / Fine silvery oil spotting / Couverte noire, genre "gouttes d'huile"	Sòng du Sud	(Hénán)	Northern temmoku	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures argentées	Bulletin Baur 75, 2015 Figure 18	Taches d'huile	Sòng ou Jīn	(Chine du Nord)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures argentées	Coll. exposées Musée Guimet Objet MA4133	Couverte noire argentée brillante	Sòng ou Jīn	(Hénán)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures argentées	Linyushanren Coll., 2015 Objet 2821	Oil spot black glaze / Lustrous black glaze / Dense pattern of fine silver oil spots	Sòng ou Jīn	Inconnue		Bol

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures brun-vert	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1897.42a-b	Iron and ash glazes	Sòng du Sud à Míng	(Fújiàn ?)		Pot à thé avec Couvercle en ivoire
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures brun-vert	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1902.16a-b	Iron glaze	Sòng du Sud ou Yuán	Hongtang, (Fújiàn)	Hongtang	Pot à thé avec Couvercle en ivoire
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures brunes	Coll. en ligne V&A Museum Objet CIRC.314-1928	mottled brown glaze	Jīn	(Chine du Nord)	Blackware	Jarre
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures brunes	Mowry et al, 1986 Cat. 50	Silvery brown oil spots / Dark brown glaze / Markings in overglaze iron oxide	Jīn	Inconnue	Cizhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures brunes	Mowry et al, 1986 Cat.51	Rust brown markings / Dark brown glaze / Markings in overglaze iron oxide	Jīn ou Yuán	Inconnue	Cizhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures brunes	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1911.370	Iron glaze	Sòng	(Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures brunes	Longsdorf Collection, 2013 Objet 55	Black glaze with rust-brown oil spots / Chocolate-brown / Lustrous black glaze with tiny rust-brown spots	Sòng	Cízhōu (Héběi)	Cizhou	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures brunes	Mowry et al, 1986 Cat.16	Russet glaze / Russet-surfaced dark brown glaze / Brown flecks / Markings in overglaze iron oxide	Sòng du Nord	Jiàncí, Dìng (Héběi)	Russet Ding	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures brunes	Bulletin Baur 73, 2013 Figure 12	Taches de rouille	Sòng ou Jīn	(Chine du Nord)		Plat

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures brunes	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3779	Iron glaze	Sòng ou Jīn	Guāntāi (Héběi)	Cizhou	Jarre
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures brunes	Mowry et Rotondo, 2000 Objet 35	Black glaze dappled in russet	Sòng ou Jīn	Cízhōu (Héběi)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures brunes	Coll. exposées Musée Guimet Objet MA4037	Couverte brune	Táng	(Chine du Nord)		Bouteille
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures brunes	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.454-1920	Black glaze streaked with brown	Yuán	(Chine du Nord)	Blackware	Gourde
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures brunes localisées	Mowry et al, 1986 Cat. 48	Russet splashes / Ground of russet flecks / Dark brown glaze / Markings in overglaze iron oxide	Jīn	Inconnue	Cizhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Petites mouchetures brunes localisées	Mowry et al, 1986 Cat. 49	Brown hare's fur markings / Dark brown glaze / Markings in overglaze iron oxide	Jīn	Inconnue	Cizhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Mouchetures globulaires	Coll. exposées Musée Guimet Objet MA4141	Couverte brune à gouttes d'huile	Jīn	Huáirén (Shānxī)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Mouchetures globulaires	Tregear, 1982 Figure 255	Thick black glaze with oil spots / Épaisse couverte noire, genre gouttes d'huile	Jīn	(Hénán)	Temmoku	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Mouchetures globulaires	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1909.369	Iron-pigmented glaze	Sòng	(Fújiàn)	Jian	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Mouchetures globulaires	Hobson, 1915 Plate 42, Figure 1	Purplish black glaze flecked with silvery drops	Sòng	Jiàn (Fújiàn)	Temmoku	Bol à thé

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Mouchetures globulaires	Beauty of Song Ceram., 2016 Objet 31	Tenmoku glaze with silvery spots	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)		Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Mouchetures globulaires	Beurdeley, 2005 Plate 43	“yohen temmoku” ou “temmoku scintillant”	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)	Jian	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Mouchetures globulaires	Expo. Japon, 1999 Objet 74	Yuteki (oil spot) temmoku / Black glaze covered in silvery spots	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)	Temmoku	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Mouchetures globulaires	Expo. Japon, 1999 Objet 75	Yöhen temmoku / Iridescent spotted black glaze	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)	Temmoku	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Mouchetures globulaires	Expo. Japon, 1999 Objet 77	Yuteki (oil spot) temmoku / Black glaze covered with silvery spots	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)	Temmoku	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Mouchetures globulaires	Mowry et al, 1986 Figure 1	Dark brown glaze / Markings in iron oxide	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)	Yuteki temmoku	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Mouchetures globulaires	Mowry et al, 1986 Figure 2	Dark brown glaze / Markings in iron oxide	Sòng du Sud	Jiàn (Fújiàn)	Yuteki temmoku	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Mouchetures globulaires	Tregear, 1982 Figure 260	Dark-glaze with brilliant oil spots / Inaba temmoku / Couverte noire, genre gouttes d'huile	Sòng du Sud	Jiàn ou Chóngān (Fújiàn)		Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Mouchetures noires	Coll. exposées Musée Guimet Un des objets EO2926, EO2181, MA2143 et MA4105	Couverte grise ou brune / écailles de tortue / fourrure de lièvre	Sòng	Jiàn ou Jízhōu (Fújiàn ou Jiāngxī)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à mouchetures	Photographie de qualité insuffisante	Tregear, 1982 Figure 256	Kaki (reddish-brown) glaze with purplish iron spots / Couverte brun kaki semée de taches pourpres d'oxyde de fer	Sòng	(Hénán)	Darkware	Bol à thé

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à taches beiges	Coulures aux bords irréguliers	Tregear, 1982 Figure 266	Shiny black and yellow glazes / Not a tortoise-shell glaze but use of same coloured glazes	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à taches beiges	Coulures aux bords irréguliers	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1901.65	Iron glaze splashed with ash glaze	Sòng du Sud ou Yuán	Jízhōu (Jiāngxī)	Jizhou	Bouteille
Motifs abstraits	Glaçure à taches beiges	Motifs « ruyi » aux bords irréguliers	Linyushanren Coll., 2015 Objet 2825	Creamy coffee brown glaze / Dark brownish glaze / Ruyi patterns in the style of tixi lacquer	Sòng ou Jīn	Jízhōu (Jiāngxī)		Vase
Motifs abstraits	Glaçure à taches beiges	taches aléatoires aux bords irréguliers	Coll. en ligne British Museum Deux des objets 1938,0412.44, 1938,0412.42, 1938,0412.46 et 1938,0516.1	<i>Pas de description spécifique</i>	Sòng	Jiàn (Fújiàn)	Jizhou	Tessons
Motifs abstraits	Glaçure à taches beiges	taches aléatoires aux bords irréguliers	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet FSC-P-123	<i>Pas de description spécifique</i>	Sòng du Sud	Nánkāng (Jiāngxī)	Jizhou	Tesson
Motifs abstraits	Glaçure à taches beiges	taches aléatoires aux bords irréguliers	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3660	Iron and ash glazes	Sòng du Sud	(Fújiàn)	Jizhou	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à taches beiges	taches aléatoires aux bords irréguliers	Expo. Singapour, 1983 Objet 161	Tortoise-shell glaze	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à taches beiges	taches aléatoires aux bords irréguliers	Kwan Coll., 1994 Objet 170	Black glaze and tortoise-shell splashes	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à taches beiges	taches aléatoires aux bords irréguliers	Tregear, 1982 Figure 269	Shiny tortoise-shell glaze / Black glaze / Shiny butterscotch-yellow glaze splashes / Couverte brillante, genre écaille de tortue	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à taches beiges	taches aléatoires aux bords irréguliers	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1913.40	Iron glaze splashed with wood- ash solution	Yuán	Jízhōu (Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à taches beiges	taches aléatoires aux bords irréguliers	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1915.46	Tortoiseshell glaze / Iron and ash glazes	Yuán	Jízhōu (Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à taches beiges	taches aléatoires globulaires	Longsdorf Collection, 2013 Objet 31	Tortoise shell glaze / Chocolate brown glaze / Opaque cloudy tan-colored splashes	Sòng	Jízhōu (Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à taches beiges	taches aléatoires globulaires	Longsdorf Collection, 2013 Objet 37	Tortoiseshell Glaze / Lustrous dark brown glaze / Caramel-yellow and reddish- brown markings	Sòng	Jízhōu (Jiāngxī)	Jizhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches beiges	taches aléatoires globulaires	Kwan Coll., 1994 Objet 171	Black glaze and tortoise-shell splashes	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches beiges	taches aléatoires globulaires	Mowry et al, 1986 Cat. 87	Tortoiseshell glaze / Dark brown and transparent amber glazes	Sòng du Sud	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches beiges	taches aléatoires globulaires	Tregear, 1982 Figure 270	Almost matt black glaze with grey splashes / Couverte noire presque mate, éclaboussée de gris	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol à thé

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à taches beiges	taches aléatoires globulaires	Mowry et al, 1986 Cat. 90	Tortoiseshell glaze / Dark brown glaze suffused with buff markings and bluish white streaks	Sòng du Sud ou Yuán	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Bol avec couvercle
Motifs abstraits	Glaçure à taches beiges	taches aléatoires globulaires	Mowry et al, 1986 Cat. 91	Tortoiseshell glaze / Dark brown glaze suffused with buff markings	Sòng du Sud ou Yuán	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Bouteille
Motifs abstraits	Glaçure à taches beiges	taches aléatoires globulaires	Mowry et al, 1986 Cat. 92	Tortoiseshell glaze / Dark brown glaze suffused with buff markings	Sòng du Sud ou Yuán	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches beiges	taches régulières en cercles concentriques	Longsdorf Collection, 2013 Objet 30	Deer spot and tortoise shell glaze / White-centered tan spots similar to markings on the fur of a fawn / Dark-brown glazed background / Cloudy bluish and reddish-tan tortoiseshell markings on a dark brown glaze	Sòng	Jízhōu (Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à taches beiges	taches régulières en cercles concentriques	Coll. exposées Musée Guimet Objet MA4275 ou MA4276	Couverte brune en écailles de tortue	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Coll. en ligne V&A Museum Objet CIRC.1531-1923	Partridge feather glaze	Jīn	(Chine du Nord)	Blackware	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Coll. exposées Musée Guimet Objet MA4284	Couverte kaki et noire avec taches brun-rouge	Jīn	(Chine du Nord)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Coll. exposées Musée Guimet Objet MA4290	Couverte noire, brune et tachetée	Jīn	(Chine du Nord)		Bol

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Coll. exposées Musée Guimet Objet MA4293	Couverte noire et tachetée	Jīn	(Chine du Nord)		Vase
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Coll. exposées Musée Guimet Un des objets MA732, MA4287,MA4298	Couverte noire, brune et tachetée	Jīn	(Chine du Nord)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Mowry et al, 1986 Cat. 45 a&b	Partridge-feather mottles / Dark brown glaze / Russet markings in overglaze iron oxide	Jīn	Inconnue	Cizhou	Bols
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.607-1918	Black glaze streaked rust brown / Partridge feather glaze	Sòng	(Chine)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Longsdorf Collection, 2013 Objet 50	Rust-splashed black glaze / Lustrous black glaze / Bright russet-brown partridge-feather mottles	Sòng	Inconnue		Vase
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Longsdorf Collection, 2013 Objet 57	Partridge feather mottled black and brown glaze / Bright reddish-brown splashes over lustrous black glaze / Russet-brown slip over the black glaze	Sòng du Nord	Cízhōu (Héběi)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Mowry et al, 1986 Cat. 34	Russet flecks / Dark brown glaze / Markings in over-glaze iron oxide	Sòng du Nord	Inconnue	Cizhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Mowry et al, 1986 Cat. 35	Partridge-feather mottles / Dark brown glaze / Russet markings in over-glaze iron oxide	Sòng du Nord	Inconnue	Cizhou	Bouteille

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Mowry et al, 1986 Cat. 36	Partridge-feather mottles / Dark brown glaze / Russet markings in over-glaze iron oxide	Sòng du Nord	Inconnue	Cizhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3366	Iron glaze	Sòng du Sud	(Jiāngxī)	Jizhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Fris-Larrouy, 1999 Objet 71.8.4	Couverte brune écaille de tortue	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Hougron, 2015 Figure page 53	Couverte métallique au fer / Effets écailles de tortue	Sòng du Sud	Inconnue		Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Beauty of Song Ceram., 2016 Objet 37	Black glaze	Sòng ou Jīn	(Hénán)		Gobelet
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Coll. en ligne British Museum Objet 1948,0413.9	Black, temmoku brown glaze	Sòng ou Jīn	(Hénán ?)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Mowry et al, 1986 Cat. 37 a&b	Partridge-feather mottles / Dark brown glaze / Russet markings in overglaze iron oxide	Sòng ou Jīn	Inconnue	Cizhou	Bols
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Mowry et al, 1986 Cat. 38 a&b	Partridge-feather mottles / Dark brown glaze Russet markings in overglaze iron oxide	Sòng ou Jīn	Inconnue	Cizhou	Bols
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Mowry et al, 1986 Cat. 39	Partridge-feather mottles / Dark brown glaze Russet markings in overglaze iron oxide	Sòng ou Jīn	Inconnue	Cizhou	Bol

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Mowry et Rotondo, 2000 Objet 34	Black glaze with russet mottles	Sòng ou Jīn	Cízhōu (Héběi)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers	Tregear, 1982 Figures 258 et 259	Combination of red kaki and a shiny black glaze / The black glaze shiny with a bluish tinge / Couvertes rouge et noire	Sòng ou Jīn	Inconnue	Northern	Bols à thé
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers et bordure blanche	Fris-Larrouy, 1999 Objet 70.5.2	Couverte brune	Sòng	(Chine du Nord)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches aléatoires aux bords irréguliers et bordure blanche	Bulletin Baur 75, 2015 Figure 16	Taches de rouille / Taches rouille sur fond noir	Sòng ou Jīn	(Chine du Nord)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.629-1918	Streaky black glaze	Jīn	(Chine du Nord)	Blackware	Bouteille
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers	Coll. en ligne V&A Museum Objet CIRC.168-1928	Black glaze and rust-brown design	Jīn	(Chine du Nord)	Blackware	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers	Coll. en ligne V&A Museum Objet CIRC.169-1928	Hare's fur glaze / Temmoku brune et noire	Jīn	(Chine du Nord)	Blackware	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers	Coll. en ligne V&A Museum Objet CIRC.71&A-1930	Black glaze and splashes of rusty brown	Jīn	(Chine du Nord)		Bol et couvercle

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers	Mowry et al, 1986 Cat. 42	Russet markings / Hare's fur glaze / Dark brown glaze, the markings in overglaze iron oxide	Jīn	Inconnue	Cizhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers	Mowry et Rotondo, 2000 Objet 39	Hare's fur glaze / Russet splashes	Jīn	(Hénán ou Héběi)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1911.373	Iron glazes	Jīn ou Yuán	(Hénán ou Shāndōng)	Cizhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers	Longsdorf Collection, 2013 Objet 42	Starburst black and brown glaze / Streaks of russet-brown over lustrous black glaze / Black glaze with bold rust-colored streaks	Sòng	Jiàn (Fújiàn)		Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers	Kwan Coll., 1994 Objet 157	Brown splashes among black glaze	Sòng du Sud	(Hénán)	Cizhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers	Coll. en ligne British Museum Objet 1947,0712.146	Brown, black glaze / Iron-brown designs	Sòng ou Jīn	(Hénán)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers	Linyushanren Coll., 2015 Objet 2824	Russet-splash / Lustrous black glaze / Glaze of dark caramel colour	Sòng ou Jīn	(Hénán)		Jarre
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers	Mowry et al, 1986 Cat. 40	Russet splashes / Medium brown glaze Dark brown glaze, the markings in overglaze iron oxide	Sòng ou Jīn	Inconnue	Cizhou	Jarre
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers	Mowry et Rotondo, 2000 Objet 32	Russet-splashed black glaze	Sòng ou Jīn	Guāntái (Héběi)		Jarre

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers	Mowry et Rotondo, 2000 Objet 33	Russet-streaked black glaze	Sòng ou Jīn	Cízhōu (Héběi)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers	Mowry et Rotondo, 2000 Objet 37	Black glaze / Large russet spots	Sòng ou Jīn	Cízhōu (Héběi)		Jarre
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers	Mowry et Rotondo, 2000 Objet 31	Black glaze with russet decoration / Russet rosettes / Dark glaze with iron oxide	Sòng ou Jīn	Inconnue	Cizhou	Jarre
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers	Pierson, 2003 Figure 10	Black glaze with russet decoration	Sòng ou Jīn	Inconnue		Jarre
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers	Hobson, 1915 Plate 43, Figure 3	Black mottle / Lustrous brown	Táng ?	(Hénán)	Honan tenmoku	Bol avec couvercle
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers et bordure blanche	Longsdorf Collection, 2013 Objet 58	Russet-splashed black glaze with white rim / Dark brown-black glaze with russet splashes / Dark chocolate-brown glaze / One thin russet streak	Jīn	Inconnue	Cizhou	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers et bordure blanche	Mowry et al, 1986 Cat. 41	White rim and five russet splashes / Dark brown glaze / Markings in overglaze iron oxide	Jīn	Inconnue	Cizhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers et bordure blanche	Mowry et Rotondo, 2000 Objet 38	White rim / Russet splashes	Jīn	Inconnue	Cizhou	Bol

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords irréguliers et bordure blanche	Coll. en ligne British Museum Objets 1924,0112.3 et 1947,0712.145	Iron black glaze and white slipped and glazed rim	Sòng ou Jīn	Jùlù (Héběi)		Bols
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords réguliers	Coll. en ligne V&A Museum Objet FE.154-1975	brown-black glaze streaked with rust-brown	Jīn	(Chine du Nord)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords réguliers	Longsdorf Collection, 2013 Objet 48	Russet-splashed brown glaze / Dark purplish-brown glaze / Splashes of russet-brown	Jīn	Inconnue	Cizhou	Vase
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords réguliers	Tregear, 1982 Figure 275	Black glaze / Red (iron-oxide) dashes painted over glaze / Couverte noire avec un décor peint en oxyde de fer	Jīn	(Shāndōng?)	Northern temmoku	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords réguliers	Priestley & Ferraro, 2014 Objet 4	Russet-spotted Black glaze	Jīn ou Yuán	Yàozhōu ? (Shǎnxī)		Jarre
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords réguliers	Expo. Japon, 1999 Objet 85	Iron-black glaze / Iron brown dots	Sòng du Nord	Inconnue		Vase
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords réguliers	Kwan Coll., 1994 Objet 24	Brown spots among black glaze	Sòng du Nord	Dìng (Héběi)		Coussin
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords réguliers	Longsdorf Collection, 2013 Objet 53	Rust-decorated black glaze / Splashes of russet	Sòng du Nord	Yàozhōu (Shǎnxī)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords réguliers	Mowry et al, 1986 Cat. 21	Dark brown glaze / Decoration painted in overglaze iron oxide	Sòng du Nord	Huángpǔ, Yàozhōu (Shǎnxī)	Black Yaozhou	Bol

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords réguliers	Mowry et al, 1986 Cat. 22	Russet Stripes / Dark brown glaze / Markings painted in overglaze iron oxide	Sòng du Nord	Huángpǔ, Yàozhōu (Shǎnxī)	Black Yaozhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords réguliers	Mowry et al, 1986 Cat. 58	Russet Stripes / Medium brown glaze / Dark brown glaze / Overglaze iron oxide	Yuán	Inconnue	Cizhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure à taches brunes « sauce »	taches disposées régulièrement aux bords réguliers	Mowry et Rotondo, 2000 Objet 42	Black glaze and russet stripes	Yuán	Guāntái (Héběi)		Bol
Motifs abstraits	Glaçure éclaboussée	Glaçure éclaboussée blanc beige	Longsdorf Collection, 2013 Objet 32	Slip decoration / Dark chocolate-brown glaze	Sòng	Jízhōu (Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure éclaboussée	Glaçure éclaboussée blanc beige	Longsdorf Collection, 2013 Objet 35	Slip decoration / Dark chocolate-brown glaze Semi-translucent slip of yellowish-caramel tone	Sòng	Jízhōu (Jiāngxī)	Jizhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure éclaboussée	Glaçure éclaboussée blanc beige	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3367	Iron and ash glazes	Sòng du Sud	(Jiāngxī)	Jizhou	Jarre
Motifs abstraits	Glaçure éclaboussée	Glaçure éclaboussée blanc beige	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3857	White slip under iron glaze	Sòng du Sud	(Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure éclaboussée	Glaçure éclaboussée blanc beige	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.99-1939	Iridescent glaze	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé
Motifs abstraits	Glaçure éclaboussée	Glaçure éclaboussée blanc beige	Mowry et al, 1986 Cat. 93	Dark brown glaze with buff markings	Sòng du Sud	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Jarre

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure élaboussée	Glaçure élaboussée blanc beige	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3140	Iron and ash glazes	Sòng du Sud ou Yuán	(Jiāngxī)	Jizhou	Brûleur à Encens
Motifs abstraits	Glaçure élaboussée	Glaçure élaboussée blanc beige	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3589	Iron and ash glazes	Sòng du Sud ou Yuán	(Jiāngxī)	Jizhou	Brûleur à Encens
Motifs abstraits	Glaçure élaboussée	Glaçure élaboussée blanc bleuté	Coll. en ligne British Museum Objet 1967,1212.2	Brown, black and blue glaze, white splashes	Táng	Inconnue		Assiette
Motifs abstraits	Glaçure élaboussée	Glaçure élaboussée blanc bleuté	Coll. en ligne British Museum Objet 1973,0723.1	Black, lavender glaze	Táng	(Chine)	Huangdao	Bouteille
Motifs abstraits	Glaçure élaboussée	Glaçure élaboussée blanc bleuté	Coll. exposées Musée Guimet Objet MA6335	Couverte élaboussée	Táng	Huángdào (Hénán)		Jarre
Motifs abstraits	Glaçure élaboussée	Glaçure élaboussée blanc bleuté	Mowry et al, 1986 Cat. 10	Blue splashes / Dark brown glaze with variegated light blue suffusions	Táng	Huángdào (Hénán)	Huangdao	Verseuse
Motifs abstraits	Glaçure élaboussée	Glaçure élaboussée blanc bleuté	Mowry et al, 1986 Cat. 11	Blue splashes / Dark brown glaze with variegated light blue suffusions	Táng	Huángdào (Hénán)	Huangdao	Jarre
Motifs abstraits	Glaçure élaboussée	Glaçure élaboussée blanc bleuté	Mowry et al, 1986 Cat. 8	Blue splashes / Dark brown glaze with variegated light blue suffusions	Táng	Lǚshān (Hénán)	Lushan	Jarre
Motifs abstraits	Glaçure élaboussée	Glaçure élaboussée blanc bleuté	Mowry et al, 1986 Cat. 9	Blue splashes / Dark brown glaze with variegated light blue splashes	Táng	Lǚshān (Hénán)	Lushan	Bouteille
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Beauty of Song Ceram., 2016 Objet 32	Ridges in white slip on black glaze ground	Jīn	Cízhōu (Héběi)		Jarre

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Beauty of Song Ceram., 2016 Objet 33	Ridges in white slip on black glaze ground	Jīn	Lǚshān (Hénán)		Verseuse
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Cat. expo. coll. Ise, 2017 Page 64	Black glaze with white ribs / Couverte noire avec nervures d'engobe blanche	Jīn	Cízhōu (Héběi)		Vase
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Cat. expo. coll. Ise, 2017 Page 66	Black glaze with white ribs / Couverte noire et nervures d'engobe blanc	Jīn	Cízhōu (Héběi)		Jarre
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3107	White slip under iron glaze	Jīn	Péngchéng (Héběi)	Cizhou	Vase
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.100-1939	Black glaze	Jīn	(Chine du Nord)		Vase
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Mowry et al, 1986 Cat. 64	Dark brown glaze over trailed white-slip ribs	Jīn	Inconnue	Cizhou	Jarre
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Tregear, 1982 Figure 76	Traits d'engobe blanc sous couverte noire	Jīn	Inconnue	Cizhou	Vase
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Tregear, 1982 Figure 8	White slip strings and shiny black glaze / Traits d'engobe blanc sous une couverte noire, brillante	Sòng	Lǚshān ou Bǎofēng (Hénán)	Cizhou	Jarre
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Expo. Japon, 1999 Objet 106	White slip under black glaze	Sòng du Nord	Inconnue		Verseuse
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Kwan Coll., 1994 Objet 164	Slipped vertical ribs and black glaze	Sòng du Nord	Zībó (Shāndōng)		Vase

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Mowry et al, 1986 Cat. 59	Dark brown glaze over carved ribs	Sòng du Nord	Inconnue	Cizhou	Jarre
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Mowry et al, 1986 Cat. 60	Dark brown glaze over trailed white-slip ribs	Sòng du Nord	Inconnue	Cizhou	Bol
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Mowry et Rotondo, 2000 Objet 25	Ribbed black glaze / Dark brown / White ribs	Sòng du Nord	Cízhōu (Héběi)		Vase
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Kwan Coll., 1994 Objet 153	Slipped vertical ribs and black glaze	Sòng du Sud	(Hénán)	Cizhou	Verseuse
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1945.10	White slip ribbing under two layers of iron glaze	Sòng ou Jīn	(Hénán, Héběi ou Shāndōng)	Cizhou	Jarre
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Mowry et al, 1986 Cat. 61	Dark brown glaze over trailed white-slip ribs / Lower portion with medium brown glaze	Sòng ou Jīn	Inconnue	Cizhou	Jarre
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Mowry et al, 1986 Cat. 62	Dark brown glaze over trailed white-slip ribs / Lower portion with medium brown glaze	Sòng ou Jīn	Inconnue	Cizhou	Bouteille
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Mowry et al, 1986 Cat. 63	Dark brown glaze over trailed white-slip ribs	Sòng ou Jīn	Inconnue	Cizhou	Verseuse
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Mowry et Rotondo, 2000 Objet 29	Ribbed black glaze	Sòng ou Jīn	(Hénán ou Héběi)		Jarre

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Pierson, 2003 Figure 11	Vertical Ribs	Sòng ou Jīn	Inconnue		Jarre
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Priestley & Ferraro, 2014 Objet 5	Ribbed Black glaze / Light- coloured slip	Sòng ou Jīn	(Hénán ou Héběi)		Jarre
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Hobson, 1915 Plate 43, Figure 2	Black glaze	Táng ?	(Hénán)	Honan temmoku	Verseuse
Motifs abstraits	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et côtelée de blanc	Mowry et Rotondo, 2000 Objet 30	Dark brown glaze / Pale tan ribs	Sòng ou Jīn	Inconnue		Jarre
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Branche en fleur	Longsdorf Collection, 2013 Objet 29	Paper-cut decoration / Very dark brown glaze / Reddish-brown and buff-colored background glaze / Tan 'tortoiseshell' markings on a dark brown glaze	Sòng	Jízhōu (Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Branche en fleur	Longsdorf Collection, 2013 Objet 38	Paper-cut decoration / Tortoiseshell glaze / Brown-black glaze on streaked reddish-brown background Cloudy bluish mottling / Caramel over dark brown ground	Sòng	Jízhōu (Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Branche en fleur	Wu, 2001 Page 81	Mottled glaze	Sòng	Jízhōu (Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Branche en fleur	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3195	<i>Pas de description spécifique</i>	Sòng du Sud	(Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Branche en fleur	Expo. Japon, 1999 Objet 80	Taibi temmoku / Design in black covered with mottled glaze	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)	Temmoku	Bol à thé

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Branche en fleur	Mowry et al, 1986 Cat. 98	Papercut decoration reserved in dark brown glaze / Variegated grayish blue ground	Sòng du Sud	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Fleurs de prunier	Coll. en ligne British Museum Objet 1973,0726.277	Buff glaze	Sòng	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Fleurs de prunier	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1913.38	Iron and ash glazes	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Fleurs de prunier	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3778	Iron and ash glazes	Sòng du Sud	(Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Fleurs de prunier	Coll. exposées Musée Guimet Objet MA4275 ou MA4276	Couverte brune à décor floral	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Fleurs de prunier	Kwan Coll., 1994 Objet 173	Paper-cut designs in black glaze	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Fleurs de prunier	Mowry et al, 1986 Cat. 101	Tortoiseshell glaze / Variegated buff ground / Papercut decoration reserved in dark brown glaze	Sòng du Sud	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Médallions géométriques quadrilobes	Coll. en ligne British Museum Objet 1922,1118.1	<i>Pas de description spécifique</i>	Sòng	Inconnue		Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Médallions géométriques quadrilobes	Coll. en ligne British Museum Objet 1938,0412.43	<i>Pas de description spécifique</i>	Sòng	Jiàn (Fújiàn)	Jizhou	Tesson

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Médailles géométriques quadrilobes	Mowry et al, 1986 Cat. 100	Tortoiseshell glaze / Variegated buff ground / Papercut decoration reserved in dark brown glaze	Sòng du Sud	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Médailles géométriques quadrilobes	Tregear, 1982 Figure 272	Black glaze with buff 'partridge feather' dappling / Paper-resist motifs / Glaze speckled yellow and buff / Couvertes noire et jaune avec un décor en réserve	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Médailles géométriques quadrilobes	Coll. exposées Musée Guimet Objet MA4159 ou MA2143	Couverte noire	Sòng ou Jīn	(Chine du Nord)		Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Phœnix et fleurs	Bulletin Baur 75, 2015 Figure 20	Écaille de tortue	Inconnue	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Phœnix et fleurs	Coll. Baur, 1994 Figure 8	Mottle glaze	Sòng	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Phœnix et fleurs	Coll. en ligne British Museum Objet 1938,0412.45	Black glaze	Sòng	Jízhōu (Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Phœnix et fleurs	Coll. en ligne British Museum Objet 1973,0726.278	Black, mottled glaze	Sòng	(China)	Jizhou	Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Phœnix et fleurs	Longsdorf Collection, 2013 Objet 33	Paper-cut decoration / Stenciled design / Very dark brown / Variegated tan and reddish-brown glaze / Splashed and streaked tan- colored 'tortoiseshell'	Sòng	Jízhōu (Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Phœnix et fleurs	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3103	Iron and ash glazes	Sòng du Sud	(Jiāngxī)	Jizhou	Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Phœnix et fleurs	Coll. en ligne V&A Museum FE.176-1974	Wax-resist design	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Phœnix et fleurs	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.41-1965	Resist papercut patterns / Black glaze with lighter overglaze	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Phœnix et fleurs	Expo. Japon, 1999 Objet 81	Taibi temmoku / Design in black covered with mottled glaze	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)	Temmoku	Vase
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Phœnix et fleurs	Kwan Coll., 1994 Objet 172	Paper-cut designs in black glaze	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Phœnix et fleurs	Mowry et al, 1986 Cat. 96	Tortoiseshell glaze / Variegated buff ground / Papercut decoration reserved in dark brown	Sòng du Sud	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Phœnix et fleurs	Mowry et al, 1986 Cat. 97	Tortoiseshell glaze / Variegated buff ground / Papercut decoration reserved in dark brown	Sòng du Sud	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Phœnix et fleurs	Mowry et al, 1986 Cat. 99	Dark brown glaze / Variegated buff ground / Papercut decoration reserved in dark brown glaze	Sòng du Sud	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	Phœnix et fleurs	Tregear, 1982 Figure 264	Two glazes: one dark the other yellow / resist motif / Couvertes noire et jaune avec décor en réserve	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol à thé

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs figuratifs	Glaçure à décor « paper-cut »	taches de léopard	Coll. en ligne British Museum Objet 1926,0414.1	Iron-brown mottle / Leopard-spot / Resist	Sòng	Jízhōu (Jiāngxī)		Brûleur à encens
Motifs figuratifs	Glaçure à décor à la feuille métallique		Mowry et al, 1986 Cat. 57	Dark brown glaze with decoration in overglaze silver	Jīn	Inconnue	Cizhou	Bouteille
Motifs figuratifs	Glaçure à décor à la feuille métallique		Mowry et al, 1986 Cat. 15	Russet glaze / Traces of decoration in overglaze gold leaf / Russet-surfaced dark brown glaze	Sòng du Nord	Jiàncí, Dìng (Héběi)	Russet Ding	Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor à la feuille métallique		Tregear, 1982 Figure 48	Shiny black glaze / gilding decoration on the glaze Couverte noire et brillante sous un décor doré	Sòng du Nord	Dìng (Héběi)		Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor à la feuille métallique		Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3515	brown glaze and gold pigment	Sòng du Sud	(Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à décor à la feuille métallique		Mowry et al, 1986 Cat. 86	Dark brown glaze, the decoration painted in overglaze gold	Sòng du Sud ou Yuán	Shuǐjí, Jiàn ? (Fújiàn)	Jian	Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor à la feuille métallique		Expo. Japon, 1999 Objet 36	Red-brown glaze / Design painted in gold and silver over glaze	Sòng ou Jīn	Dìng (Héběi)		Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor à la feuille métallique		Expo. Japon, 1999 Objet 37	Iron-black glaze / Design painted in gold over glaze	Sòng ou Jīn	Dìng (Héběi)		Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor à la feuille métallique		Expo. Japon, 1999 Objet 38	Iron-black glaze / Design painted in gold over glaze	Sòng ou Jīn	Dìng (Héběi)		Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor à la feuille métallique		Expo. Japon, 1999 Objet 35	Red-brown glaze / Design painted in gold over glaze	Sòng ou Jīn	Dìng (Héběi)		Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral beige	Coll. en ligne British Museum Objet 1938,0412.47	<i>Pas de description spécifique</i>	Sòng	Jiàn (Fújiàn)	Jizhou	Tesson

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral beige	Longsdorf Collection, 2013 Objet 36	Painted in buff-colored slip over dark chocolate-brown glaze	Sòng	Jízhōu (Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral beige	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet S2012.9.3199	White slip under brown glaze	Sòng du Sud	(Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral beige	Mowry et al, 1986 Cat. 89	Dark brown and transparent amber glazes	Sòng du Sud	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Assiette
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral beige	Tregear, 1982 Figure 271	Almost matt black glaze / Smoky-grey opaque paint Couverte noire mate avec un décor peint en gris opaque	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral beige	Mowry et al, 1986 Cat. 94	Dark brown glaze with splashes of transparent amber glaze / Decoration painted in overglaze buff	Sòng du Sud ou Yuán	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral beige	Mowry et al, 1986 Cat. 95	Dark brown glaze, the decoration painted in overglaze buff	Sòng du Sud ou Yuán	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Expo. Singapour, 1983 Objet 165	Black glaze / Iron rust splotches	Inconnue	Dēngfēng ? (Hénán)		Verseuse
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Tregear, 1982 Figure 267	Black glaze / Painted in metallic oxide into or under the glaze Décor peint en oxyde de fer sur ou sous une couverte noire	Inconnue	(Fújiàn ou Zhèjiāng)	Darkware	Vase
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Coll. en ligne British Museum Objet 1947,0712.148	Black glaze / Iron-saturated glaze / Reddish brown rust	Jīn	(Hénán)	Cizhou	Vase
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1918.146	Iron glaze and iron pigment	Jīn	Húnyuán (Shānxī)	Cizhou	Bouteille

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1929.12a-b	Black glaze and iron oxide decoration	Jin	(Chine)	Cizhou	Jarre
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.359-1921	Black glaze and rust-brown painted floral sprays	Jin	(Chine du Nord)		Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.47-1929	Black glaze and painted decoration / Painted design on a brown ground	Jin	(Chine du Nord)	Blackware	Gourde
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Coll. en ligne V&A Museum Objet C.929-1935	Black glaze and painted decoration / Rust-brown on black ground	Jin	(Chine du Nord)	Northern	Vase
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Coll. en ligne V&A Museum Objet CIRC.983-1924	Design painted in rust-brown over a black glaze / Leaf design in rust brown	Jin	(Chine du Nord)	Blackware	Jarre
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Coll. exposées Musée Guimet Objet EO2434	Couverte noire / Motif floral réalisé à partir d'oxydes métalliques	Jin	(Chine du Nord)		Jarre
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Expo. Japon, 1999 Objet 86	Iron-black glaze / Design painted in iron-brown	Jin	Inconnue		Vase
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Linyushanren Coll., 2015 Objet 2823	Russet-painted black glaze / Reserved decor of russet-brown tone against black ground	Jin	(Hénán)		Jarre
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Longsdorf Collection, 2013 Objet 59	Russet-painted black glaze / Glossy black glaze of silvery tone	Jin	Inconnue	Cizhou	Jarre
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Mowry et al, 1986 Cat. 52	Dark brown glaze / Russet decoration painted in overglaze iron oxide	Jin	Inconnue	Cizhou	Bouteille

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Mowry et al, 1986 Cat. 53	Dark brown glaze / Decoration painted in overglaze iron oxide	Jīn	Inconnue	Cizhou	Bouteille
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Mowry et al, 1986 Cat. 54	Glazed in hues of greenish tea-dust with blue undertones / Decoration painted in overglaze iron oxide	Jīn	Inconnue	Cizhou	Jarre
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Mowry et Rotondo, 2000 Objet 40	Tea-dust glaze	Jīn	Cízhōu (Héběi)		Bouteille
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Mowry et al, 1986 Cat. 55	Dark brown glaze / Decoration painted in overglaze iron oxide	Jīn ou Yuán	Inconnue	Cizhou	Bouteille
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Mowry et al, 1986 Cat. 56	Dark brown glaze / Decoration painted in overglaze iron oxide	Jīn ou Yuán	Inconnue	Cizhou	Bouteille
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Mowry et Rotondo, 2000 Objet 41	Black glaze and russet floral decoration	Jīn ou Yuán	Cízhōu (Héběi)		Bouteille
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Kwan Coll., 1994 Objet 155	Iron-rust floral sprays on black ground	Sòng du Sud	(Hénán)	Cizhou	Vase
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Coll. exposées Musée Guimet Objet MA4159 ou MA2143	Couverte noire	Sòng ou Jīn	(Chine du Nord)		Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à décor floral peint	Motif floral brun « sauce »	Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F1917.192	Iron glaze and painted iron decoration	Yuán	(Shǎnxī)	Cizhou	Bouteille
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Coll. en ligne British Museum Objet 1936,1012.169	Black slip	Jīn	(Héběi ?)	Cizhou	Coussin

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Kwan Coll., 1994 Objet 149	Desing painted in black	Jīn	Cízhōu (Héběi)		Vase
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Coll. en ligne Smithsonian Museum Objet F2003.1a-e	White slip and iron glaze	Jīn ou Yuán	(Shānxī ou Héběi)	Cizhou	Bouteille
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Linyushanren Coll., 2015 Objet 2836	Sgraffiato / Blackish brown slip / Black slip and covered with a colourless glaze	Jīn ou Yuán	Cízhōu (Héběi)		Jarre
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Mowry et al, 1986 Cat. 66	Dark brown glaze / Decoration cut into the glaze before firing	Jīn ou Yuán	Inconnue	Cizhou	Bouteille
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Coll. exposées Musée Guimet Objet MA4113	Décor peint sous couverte	Sòng	Cízhōu (Héběi)		Vase
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Hougron, 2015 Figure page 67	<i>Pas de description spécifique</i>	Sòng	Cízhōu (Héběi)		Oreiller
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Hougron, 2015 Figure page 67	<i>Pas de description spécifique</i>	Sòng	Cízhōu (Héběi)		Boîte
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Beauty of Song Ceram., 2016 Objet 27	Sgraffito design carved through black glaze	Sòng du Nord	Cízhōu (Héběi)		Vase
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Coll. en ligne British Museum Objet 1947,0712.152	Black glaze and white slip	Sòng du Nord	(Chine)	Cizhou	Vase
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Coll. en ligne British Museum Objet 1968,0422.25	Black and white / Slip painted	Sòng du Nord	(Shānxī)	Cizhou	Vase à vin
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Hougron, 2015 Figure page 67	Engobe noir et blanc	Sòng du Nord	Inconnue	Cizhou	Oreiller

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Kwan Coll., 1994 Objet 139	<i>Pas de description spécifique</i>	Sòng du Nord	Cízhōu (Héběi)		Vase
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Kwan Coll., 1994 Objet 196	Sgraffiato design	Xīxià	Cíyáobǎo (Níngxià)		Vase
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Mowry et al, 1986 Cat. 72	Medium brown glaze	Xīxià	Inconnue	Cizhou	Jarre
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Mowry et al, 1986 Cat. 73	Khabi brown glaze	Xīxià	Cíyáobǎo, Língwǔ (Níngxià)	Cizhou	Bouteille
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Mowry et al, 1986 Cat. 74	Rust brown glaze	Xīxià	Cíyáobǎo, Língwǔ (Níngxià)	Cizhou	Bouteille
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Mowry et al, 1986 Cat. 67	Dark brown glaze over white slip	Xīxià, Jīn ou Yuán	Inconnue	Cizhou	Jarre
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Mowry et al, 1986 Cat. 68	Dark brown glaze over white slip	Xīxià, Jīn ou Yuán	Inconnue	Cizhou	Bouteille
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Mowry et al, 1986 Cat. 75	Decoration cut into the glaze before firing	Xīxià, Jīn ou Yuán	Inconnue	Cizhou	Cantine
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Coll. exposées Musée Guimet Objet MA4167	Décor de feuillage décor incisé et champlevé	Yuán	Cízhōu (Héběi)		Pot
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Mowry et al, 1986 Cat. 69	Kaki brown glaze	Yuán	Inconnue	Cizhou	Jarre
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Mowry et al, 1986 Cat. 70	Medium brown glaze	Yuán ou Míng	Inconnue	Cizhou	Jarre
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito		Mowry et al, 1986 Cat. 71	Medium brown glaze	Yuán ou Míng	Inconnue	Cizhou	Jarre
Motifs figuratifs	Glaçure à décors en sgraffito ?		Kwan Coll., 1994 Objet 175	Painted design in brown	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)		Vase

Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs figuratifs	Glaçure à impression de feuille		Coll. en ligne British Museum Objet 1973,0726.279	Leaf on black glaze	Sòng	Jízhōu (Jiāngxī)	Blackware	Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à impression de feuille		Longsdorf Collection, 2013 Objet 34	Brown glaze with leaf decoration / Very dark brown glaze / Imprint of leaf in reddish-brown and light buff tones	Sòng	Jízhōu (Jiāngxī)	Jizhou	Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à impression de feuille		Beauty of Song Ceram., 2016 Objet 30	Tenmoku glaze with leaf design	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à impression de feuille		Beurdeley, 2005 Plate 44	Empreinte de feuille sur fond noir	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)	Jizhou temmoku	Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à impression de feuille		Expo. Japon, 1999 Objet 79	Konoba tommoku / Leaf pattern in mottled black glaze	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)	Temmoku	Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à impression de feuille		Kwan Coll., 1994 Objet 174	Black glaze and leaf skeleton design	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à impression de feuille		Linyushanren Coll., 2015 Objet 2818	Brownish-buff leaf against a dark-brown glaze	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol à thé
Motifs figuratifs	Glaçure à impression de feuille		Mowry et al, 1986 Cat. 107	Decoration of three leaves / Dark brown glaze / Reserved decoration	Sòng du Sud	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à impression de feuille		Mowry et al, 1986 Cat. 108	Leaf decor / Opaque dark brown glaze / Tortoiseshell markings in transparent dark amber glaze	Sòng du Sud	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Bol

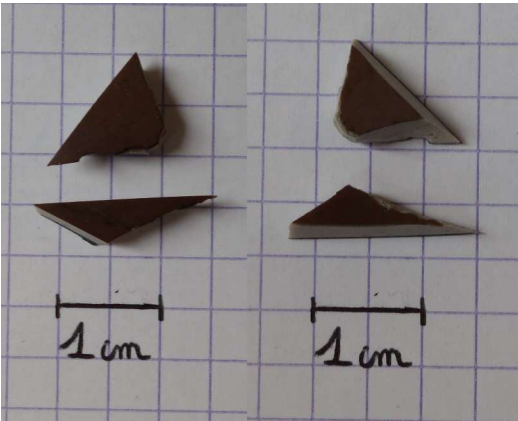
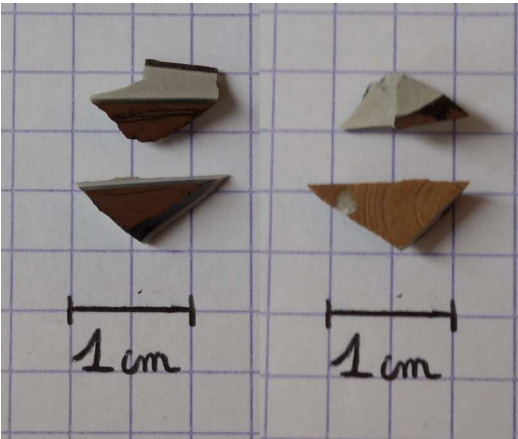
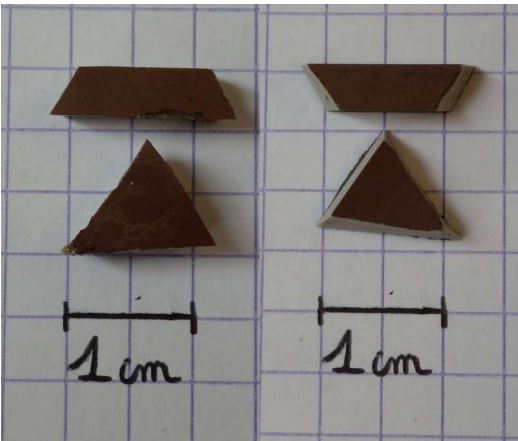
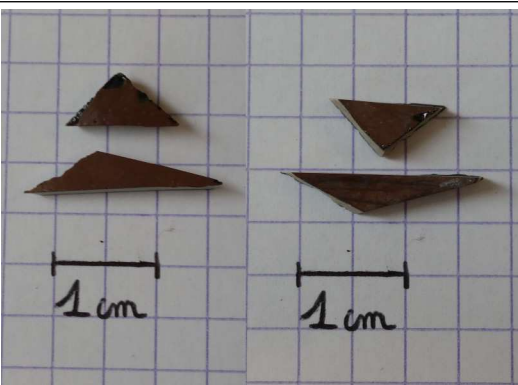
Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs figuratifs	Glaçure à impression de feuille		Tregear, 1982 Figure 25	Black glaze / Leaf employed as reserve motif Couverte noire avec décor en réserve	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)		Bol
Motifs figuratifs	Glaçure à impression de feuille		Hobson, 1915 Plate 43, Figure 1	Purplish black glaze, stencilled leaf in golden brown	Táng ?	(Hénán)	Honan tenmoku	Bol
Motifs figuratifs	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur brune et décors blancs	Mowry et al, 1986 Cat. 112	Medium brown glaze over white slip	Míng	Inconnue	Cizhou	Bouteille
Motifs figuratifs	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et décors blancs	Tregear, 1982 Figure 261	Dark-brown glaze / Reserved drawing / Couverte brun sombre avec décor en réserve	Sòng du Sud	Jízhōu (Jiāngxī)	Jizhou	Vase
Motifs figuratifs	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et décors blancs	Mowry et al, 1986 Cat. 102	Selected details incised through the brown glaze	Sòng du Sud ou Yuán	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Vase
Motifs figuratifs	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et décors blancs	Mowry et al, 1986 Cat. 103	Decoration reserved in the biscuit against dark brown glaze	Sòng du Sud ou Yuán	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Bouteille
Motifs figuratifs	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et décors blancs	Mowry et al, 1986 Cat. 104	Dark brown glaze / Decoration reserved against the dark brown glaze	Sòng du Sud ou Yuán	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Bouteille
Motifs figuratifs	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et décors blancs	Mowry et al, 1986 Cat. 105	Dark brown glaze / Reserved decoration	Sòng du Sud ou Yuán	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Bouteille
Motifs figuratifs	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et décors blancs	Mowry et al, 1986 Cat. 106	Dark brown glaze / Reserved decoration	Sòng du Sud ou Yuán	Yǒnghé (Jiāngxī)	Jizhou	Vase

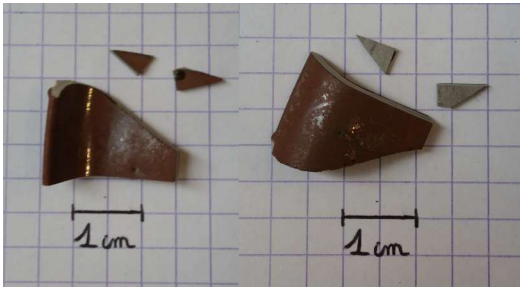
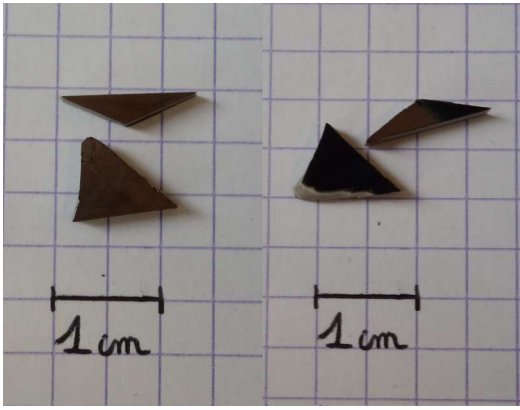
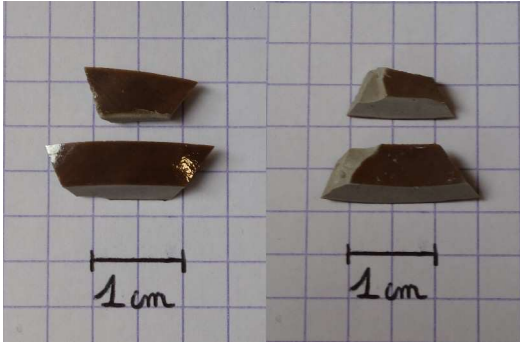
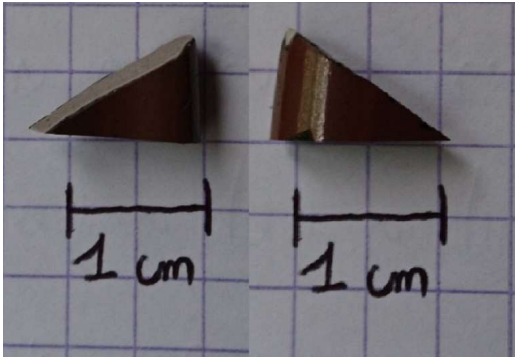
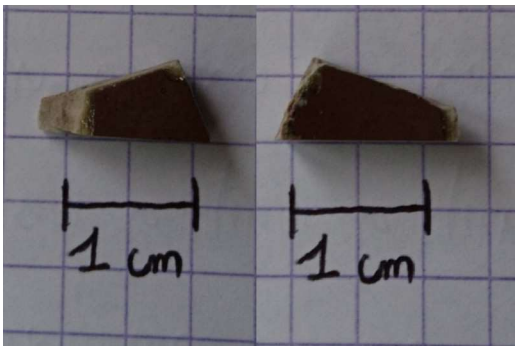
Classe	Groupe	Catégorie	Publication/Collection Numéro d'objet/figure	Description des glaçures (couleur/motif)*	Dynastie/Période	Complexe de fours (Province)	Type/Style**	Objet
Motifs figuratifs	Glaçure unie opaque brillante à décor blanc	Couleur noire et décors blancs	Mowry et al, 1986 Cat. 65	Dark brown glaze decoratively applied over white slip	Táng	Huángpǔ, Yàozhōu (Shǎnxī)	Huangpu Blackware	Assiette
Motifs figuratifs	Glaçure unie translucide à décor blanc	Couleur brune et décors blancs	Mowry et al, 1986 Cat. 111	Decoration reserved against the medium brown glaze / Rim and reserved designs with clear glaze over white slip	Sòng du Sud	Báishě (Jiāngxī)	Nanfeng	Bol

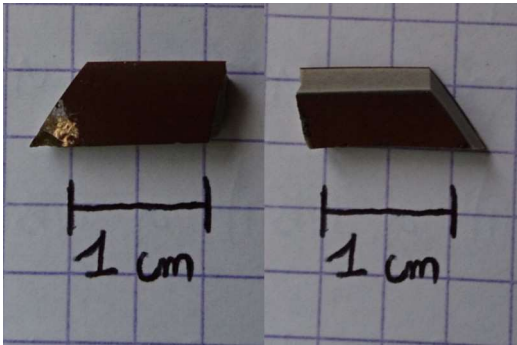
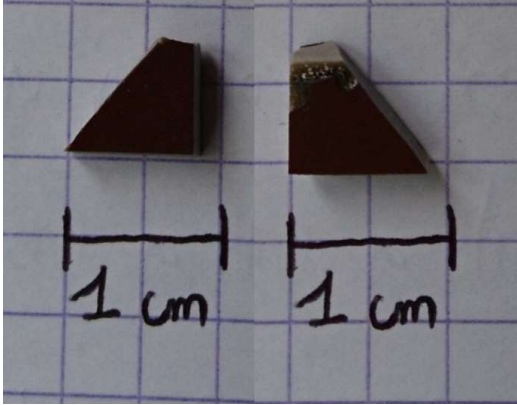



Tableau 17 : Étude des glaçures noires et brunes de la littérature spécialisée (cette colonne regroupe les expressions utilisées dans la référence associées uniquement à la couleur de la glaçure/ ** cette colonne indique les éventuels styles ou types mentionnés comme tels dans la référence)*

Annexe 3 : Corpus détaillé des échantillons disponibles




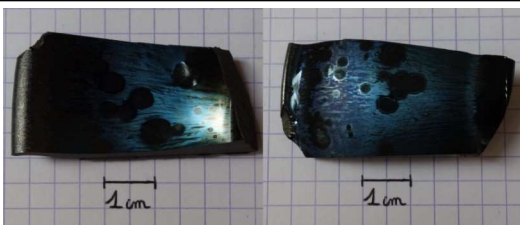
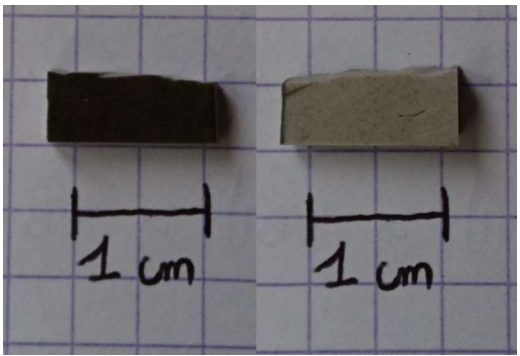
Échantillon	Photographie	Provenance	Datation	Type de glaçure
BG-01		Huángbǎo (Shǎnxī)	Sòng du Nord (960-1127)	Glaçure unie opaque brillante de couleur brun « sauce »
BG-02		Huángbǎo (Shǎnxī)	Sòng du Nord (960-1127)	Glaçure noire à décors abstraits disposés régulièrement de couleur brun « sauce »
BG-03		Huángbǎo (Shǎnxī)	Sòng du Nord (960-1127)	Glaçure unie opaque brillante noire (surface intérieure) Glaçure unie translucide de couleur brun foncé (surface extérieure)
BG-04		Huángbǎo (Shǎnxī)	Sòng du Nord (960-1127)	Glaçure à décor « taches de rouille »
BG-05		Huángbǎo (Shǎnxī)	Sòng du Nord (960-1127)	Glaçure unie opaque brillante de couleur brun « sauce »

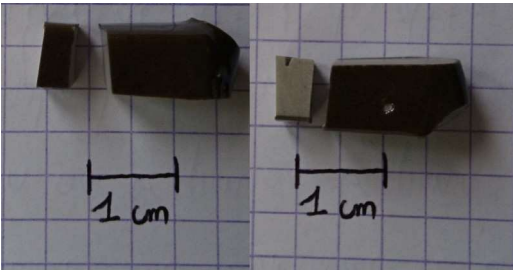
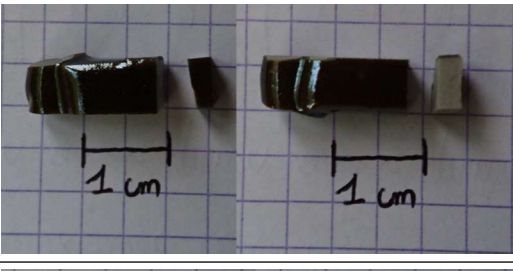
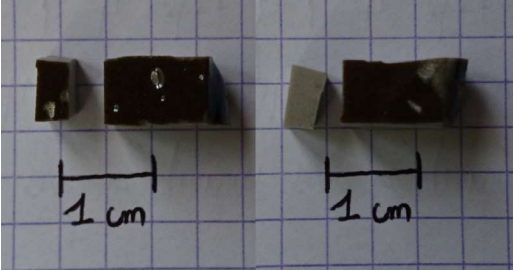

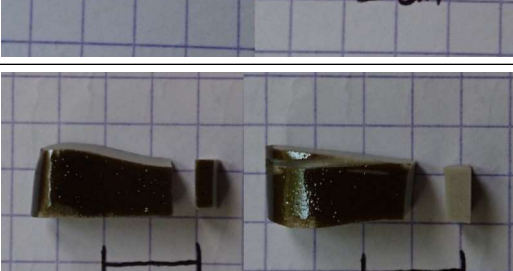

Échantillon	Photographie	Provenance	Datation	Type de glaçure
BG-06		Huángbǎo (Shǎnxī)	Sòng du Nord (960-1127)	Glaçure unie opaque brillante de couleur brun « sauce »
BG-07		Huángbǎo (Shǎnxī)	Sòng du Nord (960-1127)	Glaçure unie opaque brillante de couleur brun « sauce »
BG-08		Huángbǎo (Shǎnxī)	Sòng du Nord (960-1127)	Glaçure unie opaque brillante de couleur brun « sauce »
BG-09		Huángbǎo (Shǎnxī)	Sòng du Nord (960-1127)	Glaçure unie opaque brillante de couleur brun « sauce »

Échantillon	Photographie	Provenance	Datation	Type de glaçure
BG-10		Huángbǎo (Shǎnxī)	Sòng du Nord (960-1127)	Glaçure unie opaque brillante de couleur brun « sauce »
BG-11		Huángbǎo (Shǎnxī)	Sòng du Nord (960-1127)	Glaçure noire à décors abstraites disposés régulièrement de couleur brun « sauce »
BG-12		Huángbǎo (Shǎnxī)	Sòng du Nord (960-1127)	Glaçure unie opaque brillante de couleur brun « sauce »
BG-13		Yīngōu (Shǎnxī)	Sòng du Nord (960-1127)	Glaçure unie opaque brillante de couleur brun « sauce »
BG-14		Yīngōu (Shǎnxī)	Sòng du Nord (960-1127)	Glaçure unie opaque brillante de couleur brun « sauce »

Échantillon	Photographie	Provenance	Datation	Type de glaçure
BG-15		Yīngōu (Shǎnxī)	Sòng du Nord (960-1127)	Glaçure unie opaque brillante de couleur brun « sauce »
BG-16		Yīngōu (Shǎnxī)	Sòng du Nord (960-1127)	Glaçure unie opaque brillante de couleur brun « sauce »
LHP-01		Lúhuāpíng (Fújiàn)	Sòng (960-1279)	Glaçure à décor « fourrure de lièvre »
LHP-02		Lúhuāpíng (Fújiàn)	Sòng (960-1279)	Glaçure à décor « fourrure de lièvre »
LHP-03		Lúhuāpíng (Fújiàn)	Sòng (960-1279)	Glaçure à décor « fourrure de lièvre »

Échantillon	Photographie	Provenance	Datation	Type de glaçure
LuhuWu		Lúhuāpíng (Fújiàn)	Sòng (960-1279)	Glaçure à décor « fourrure de lièvre »
DLHM-04	Section transverse en résine uniquement	Dàlùhòumén (Fújiàn)	Sòng (960-1279)	Glaçure à décor « fourrure de lièvre »
DLHM-06	Section transverse en résine uniquement	Dàlùhòumén (Fújiàn)	Sòng (960-1279)	Glaçure à décor « fourrure de lièvre »
DLHM-19		Dàlùhòumén (Fújiàn)	Sòng (960-1279)	Glaçure à décor « fourrure de lièvre »
DLHM-36		Dàlùhòumén (Fújiàn)	Sòng (960-1279)	Glaçure à décor « fourrure de lièvre »
DLHM-40		Dàlùhòumén (Fújiàn)	Sòng (960-1279)	Glaçure à décor « fourrure de lièvre »
BZ-01		Tiānmù (Zhèjiāng)	Inconnue	Glaçure à décor « fourrure de lièvre »
BZ-02		Tiānmù (Zhèjiāng)	Inconnue	Glaçure unie translucide de couleur brun foncé

Échantillon	Photographie	Provenance	Datation	Type de glaçure
BZ-03		Tiānmù (Zhèjiāng)	Inconnue	Glaçure translucide de couleur brun foncé et noire
TZ-28		Dìngzhōu (Héběi)	Sòng du Nord (960-1127)	Glaçure brillante de couleur brun « sauce » avec mouchetures noires
SUN-1		Sūn Jiànxìng	Contemporain	Glaçure noire à décor « gouttes d'huile » et reflets bleutés
SUN-2		Sūn Jiànxìng	Contemporain	Glaçure noire à décor « gouttes d'huile » et reflets bleutés
G-plissé	Section transverse en résine uniquement	Jean Girel	Contemporain	Glaçure noire à décor « gouttes d'huile » et reflets bleutés
G-lisse	Section transverse en résine uniquement	Jean Girel	Contemporain	Glaçure noire à décor « gouttes d'huile » et reflets bleutés
ZJ-01		Ren Shuanmin	Contemporain	Glaçure unie opaque brillante de couleur brun foncé

Échantillon	Photographie	Provenance	Datation	Type de glaçure
ZJ-02		Ren Shuanmin	Contemporain	Glaçure unie opaque brillante de couleur brun foncé
ZJ-03		Ren Shuanmin	Contemporain	Glaçure unie opaque brillante de couleur brun foncé
ZJ-04		Ren Shuanmin	Contemporain	Glaçure unie opaque brillante de couleur brun foncé
ZJ-05		Ren Shuanmin	Contemporain	Glaçure unie opaque brillante de couleur brun foncé
ZJ-06		Ren Shuanmin	Contemporain	Glaçure unie opaque brillante de couleur brun foncé
ZJ-07		Ren Shuanmin	Contemporain	Glaçure unie opaque brillante de couleur brun foncé

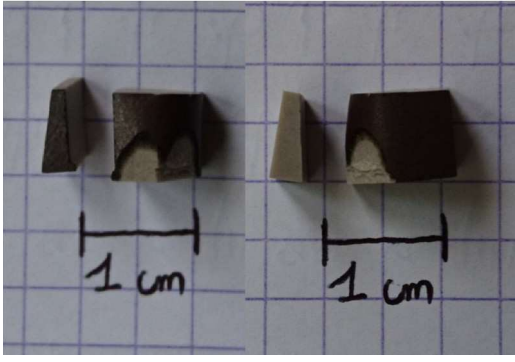
Échantillon	Photographie	Provenance	Datation	Type de glaçure
ZJ-08		Ren Shuanmin	Contemporain	Glaçure unie opaque brillante de couleur brun foncé

Tableau 18 : Tableau récapitulatif des fragments disponibles pour analyse en France



Figure 90 : Carte de la Chine avec la position des sites archéologiques dont proviennent les tessons anciens du corpus

Annexe 4 : Compositions élémentaires mesurées par PIXE

Échantillon	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	Cl	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	NiO	CuO	ZnO	Ga ₂ O ₃	As ₂ O ₃	Rb ₂ O	SrO	Y ₂ O ₃	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅
BG-01	2937	7000	224433	697400	929	174	27507	7897	17553	11473	243	126	83	12	48	48	42	10	170	263	59	533	32
BG-02	4427	6974	256271	669640	884	19	22088	8868	18807	10587	217	113	117	40	12	47	51	21	151	190	49	461	35
BG-03	2530	7160	292833	635867	491	42	16947	6100	18343	18243	303	151	46	22	11	21	66	16	101	144	45	706	67
BG-04	2460	5877	243233	691433	1002	85	17647	6323	19900	11037	255	124	61	23	28	21	44	19	111	179	62	489	32
BG-05	1395	5989	226972	688886	881	62	28956	7636	23863	13727	232	147	107	34	41	65	57	23	197	228	72	624	43
BG-06	3835	6790	292200	629900	921	8	25635	11410	18145	9480	264	97	195	36	46	62	59	20	151	165	60	308	27
BG-07	3483	7220	286367	632600	753	80	25600	12450	20580	9907	236	104	173	39	44	74	56	14	150	186	52	379	31
BG-08	3367	6737	299100	626133	895	24	24573	9707	18390	9827	266	107	160	38	42	65	58	17	149	172	47	323	23
BG-09	4073	7363	277033	640733	1190	78	25073	15273	18170	9587	260	110	191	18	40	66	53	5	147	195	61	379	26
BG-10	4310	7746	281760	640880	961	47	23772	10524	19060	9864	245	97	178	31	47	68	53	14	137	178	52	366	33
BG-11	4506	7025	283229	641745	844	0	22732	8883	19397	10496	203	103	119	21	22	86	52	10	142	164	52	348	31
BG-12	2880	7294	282340	638440	755	7	22574	12442	22330	9488	238	100	177	45	46	66	53	20	142	175	57	699	30
LHP-01	506	4432	225017	648816	1048	48	26383	981	80044	11438	220	92	699	53	37	101	43	34	228	18	48	339	28
LHP-02	694	4014	207290	662621	1334	276	22581	2253	86378	10696	252	133	912	45	134	106	40	34	189	30	40	433	31
LHP-03	646	4409	214541	667641	1208	51	23122	1856	75346	9937	214	81	692	50	32	90	41	30	195	28	56	512	25
LuhuWu	653	4681	220889	657920	1594	121	24761	780	76077	10270	185	83	1047	60	33	97	41	34	204	32	75	1054	24
DLMH-04	411	4073	197000	693133	1177	5	25697	4959	64530	7227	174	83	967	43	38	88	37	30	217	53	74	520	27
DLMH-06	649	4687	218350	652783	1242	327	26457	5332	78948	9600	261	96	846	51	48	96	43	30	219	49	55	387	28
DLMH-19	537	4335	196700	716775	787	202	26448	4151	45050	3845	115	53	1431	37	48	110	34	45	195	100	63	300	32
DLMH-36	661	4925	169575	728300	1586	168	24373	8965	52378	7405	168	70	880	38	39	95	33	33	213	81	55	370	31
DLMH-40	628	5032	191820	692260	1502	136	26306	8682	63016	8724	187	104	1050	47	53	164	37	22	218	87	42	519	33
BZ-01	1467	4723	192933	698600	1133	267	30557	6233	57327	5087	124	44	1101	33	33	139	39	36	298	50	52	277	42

Échantillon	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	Cl	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	NiO	CuO	ZnO	Ga ₂ O ₃	As ₂ O ₃	Rb ₂ O	SrO	Y ₂ O ₃	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅
BZ-02	958	2295	170100	783550	0	83	30945	3530	7385	624	9	0	378	4	11	45	40	29	193	26	29	65	46
BZ-03	7590	2220	172800	768850	0	31	33560	5995	7615	719	9	0	644	5	7	79	41	13	201	50	15	61	40
TZ-28	7535	6926	368744	566119	956	977	14476	10785	12958	8103	107	114	147	34	34	34	58	15	63	165	25	423	51

Tableau 19 : Compositions moyennes (ppm d'oxyde) mesurées dans les sections des pâtes (les valeurs indiquées en rouge correspondent à des valeurs inférieures à trois fois la limite de quantification déterminées sur les spectres mais tout de même supérieures à cette dernière)

Des traces de soufre et de baryum ont été occasionnellement mesurée sur les pâtes. La quantité moyenne de soufre mesurée sur BG-01 est de 1453 ppm, significativement au dessus de tous les autres échantillons et également au dessus de trois fois la limite de quantification. Les traces de chlore trouvées sur les différents échantillons sont probablement dues à la résine d'enrobage.

Échantillon	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	Cl	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	NiO	CuO	ZnO	Ga ₂ O ₃	As ₂ O ₃	Rb ₂ O	SrO	Y ₂ O ₃	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅
BG-01	3590	15410	193650	681400	1325	401	30125	23775	39220	9505	85	492	41	39	21	45	6	172	408	48	298	39
BG-02	7054	21520	142265	684165	1586	115	27645	52580	54706	6335	51	872	22	43	43	40	18	155	367	48	385	22
BG-03 (noire)	6810	23340	163900	651300	1760	329	25160	66510	50260	8990	69	840	50	47	47	36	6	124	335	38	297	38
BG-03 (brune)	3900	18200	210400	638900	1740	481	22940	49110	40320	11740	88	561	51	23	27	47	17	117	314	31	542	35
BG-04	4620	16870	176200	685650	1775	312	29450	36450	39075	7665	74	672	34	76	62	30	25	153	341	45	525	22
BG-05	624	8710	150192	652977	1503	135	47975	49977	71026	15331	143	952	104	118	98	63	26	301	584	98	423	47
BG-06	4890	16765	177950	685200	1890	346	30230	26520	46435	7950	75	808	66	85	41	38	17	164	281	38	374	21
BG-07	4750	17253	184100	669800	1937	252	28887	39060	44190	8010	36	732	47	86	42	43	8	153	354	50	495	24
BG-08	4875	16115	178650	690350	1950	392	30210	23995	44260	7690	53	745	68	80	36	37	9	170	291	35	347	19
BG-09	5905	18460	173550	676350	1720	404	27940	39540	46975	7610	33	816	89	70	33	37	5	145	343	45	322	19
BG-10	5397	16540	210500	660700	1537	612	27563	27077	40157	8330	71	637	64	82	43	43	11	150	336	48	377	18
BG-11	6814	21746	147832	682739	2024	60	27367	54885	47416	7026	28	790	99	64	45	32	7	146	350	53	488	23

Échantillon	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	Cl	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	NiO	CuO	ZnO	Ga ₂ O ₃	As ₂ O ₃	Rb ₂ O	SrO	Y ₂ O ₃	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅
BG-12	3958	14160	220750	657475	1295	668	26615	29835	35618	8345	76	503	37	79	45	49	17	151	285	50	340	25
LHP-01	890	16944	196231	602327	13752	20	32686	53253	69452	6379	15	6145	64	126	225	48	58	265	434	64	316	21
LHP-02	890	16023	186888	613211	10764	73	28659	60105	69256	6942	37	4726	57	155	269	34	134	237	523	64	320	33
LHP-03	674	16619	198917	599629	10463	53	29906	63514	66701	5463	40	5832	69	122	249	50	78	255	513	74	281	36
LuhuWu	934	15409	209691	601754	11821	70	30145	42286	72327	7112	85	6807	69	105	219	43	71	260	355	68	332	29
DLMH-04	680	17760	194450	595000	11085	188	29420	73185	65265	5460	54	6395	61	153	250	36	94	229	566	80	280	36
DLMH-06	825	16618	201920	594900	10094	152	29002	60740	72430	6740	59	5608	67	160	286	39	95	234	435	60	305	31
DLMH-19	577	15705	201150	611400	10125	707	28970	49445	69685	5685	40	5500	81	109	210	37	74	212	385	82	266	31
DLMH-36	818	14317	198700	627133	8920	316	25890	51923	60020	5910	56	5040	49	76	213	37	88	234	401	63	303	31
DLMH-40	1225	16170	191200	605550	10110	358	28660	72425	63435	5345	71	4520	53	120	510	42	32	244	660	59	269	38
BZ-01	2445	16400	180200	636800	4765	783	34405	52605	62575	4890	35	3375	45	77	189	36	52	292	270	54	260	26
BZ-02	1089	11340	150200	688600	5570	1090	33225	55340	40580	4655	10	7745	9	283	67	36	132	196	251	31	216	33
BZ-03	7160	18965	128900	652100	10150	422	24950	94520	47015	5630	33	9555	22	28	36	28	20	140	431	30	247	33
TZ-28	12595	20328	156226	674822	1716	720	22612	40886	57663	9200	77	1092	57	72	115	28	38	121	247	42	509	29

Tableau 20 : Compositions moyennes (ppm d'oxyde) mesurées dans les sections des glaçures (les valeurs indiquées en rouge correspondent à des valeurs inférieures à trois fois la limite de quantification déterminées sur les spectres mais tout de même supérieures à cette dernière)

Dans les glaçures, des traces de vanadium, de soufre et de baryum ont été occasionnellement trouvées. Elle se situent néanmoins pour tous les échantillons en dessous de trois fois la limite de quantification, elles n'ont donc pas été indiquées sur le tableau. Comme pour les pâtes, les traces de chlore trouvées sur les différents échantillons sont probablement dues à la résine d'enrobage.

Annexe 5 : Affinements par la méthode de Rietveld

Échantillon	Mullite	Quartz	Cristobalite	Hématite	Indialite	Rwp ; Chi2
BG-01	85,4 %	6,7 %	7,9 %	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>	16,0 ; 0,9518
BG-02	70,2 %	17,0 %	12,8 %	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>	13,2 ; 2,790
BG-03	77,7 %	10,4 %	11,9 %	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>	13,0 ; 3,348
BG-04	50,3 %	28,5 %	21,2 %	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>	28,0 ; 43,27
BG-05	58,4 %	13,6 %	22,1 %	<i>Non considérée</i>	5,9 %	14,5 ; 4,567
BG-06	93,6 %	1,8 %	4,6 %	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>	15,4 ; 2,126
BG-07	99,0 %	1,0 %	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>	14,2 ; 1,996
BG-08	93,5 %	1,1 %	5,4 %	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>	12,4 ; 1,378
BG-09	88,2 %	1,4 %	10,4 %	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>	15,1 ; 1,741
BG-10	95,6 %	0,5 %	3,9 %	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>	15,0 ; 1,602
BG-11	72,8 %	7,5 %	19,7 %	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>	13,0 ; 2,908
BG-12	91,0 %	2,3 %	6,7 %	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>	13,3 ; 2,506
BZ-01	72,8 %	15,1 %	12,1 %	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>	17,7 ; 3,731
BZ-02	39,7 %	58,7 %	1,6 %	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>	22,1 ; 7,582
BZ-03	35,5 %	64,5 %	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>	22,5 ; 8,852
DLMH-04	61,4 %	24,4 %	10,6 %	3,6 %	<i>Non considérée</i>	24,4 ; 13,78
DLMH19	49,7 %	10,8 %	38,2 %	1,3 %	<i>Non considérée</i>	20,7 ; 10,50
DLMH36	49,8 %	13,3 %	33,4 %	3,5 %	<i>Non considérée</i>	25,4 ; 23,11
DLMH40	52,7 %	34,1 %	10,5 %	2,7 %	<i>Non considérée</i>	12,8 ; 6,447
LHP01	74,1 %	10,9 %	10,7 %	4,3 %	<i>Non considérée</i>	14,7 ; 4,633
LHP02	59,9 %	21,2 %	13,0 %	5,9 %	<i>Non considérée</i>	20,2 ; 12,56
LHP03	67,6 %	17,8 %	10,1 %	4,5 %	<i>Non considérée</i>	14,2 ; 5,696
LuhuWu	81,6 %	7,1 %	7,4 %	3,9 %	<i>Non considérée</i>	14,3 ; 3,116

Tableau 21 : Proportions des phases présentes dans la pâte des échantillons archéologiques déterminées par la méthode de Rietveld avec Fullprof

Échantillon	Paramètre a (Å)	Paramètre b (Å)	Paramètre c (Å)	R-Bragg
BG-01	7,5403	7,6926	2,8881	4,21
BG-02	7,5457	7,7067	2,8917	5,93
BG-03	7,5491	7,7022	2,8902	5,76
BG-04	7,5457	7,7028	2,8917	9,28
BG-05	7,5486	7,7029	2,8907	5,96
BG-06	7,5384	7,6934	2,8863	6,34
BG-07	7,5392	7,6933	2,8877	5,97
BG-08	7,5389	7,6937	2,8866	4,33
BG-09	7,5402	7,6958	2,8872	5,91
BG-10	7,5391	7,6945	2,8874	5,41
BG-11	7,5446	7,7000	2,8890	4,83
BG-12	7,5459	7,7001	2,8905	5,43
BZ-01	7,5769	7,7354	2,9079	8,05
BZ-02	7,5579	7,6978	2,8904	11,1
BZ-03	7,5527	7,6998	2,8903	30,0
DLMH-04	7,5672	7,7265	2,9039	10,0
DLMH19	7,5392	7,6921	2,8852	12,6
DLMH36	7,5704	7,7296	2,9025	15,8
DLMH40	7,5694	7,7258	2,9027	6,25
LHP01	7,5706	7,7317	2,9053	6,24
LHP02	7,5718	7,7315	2,9036	9,46
LHP03	7,5686	7,7287	2,9044	5,97
LuhuWu	7,5692	7,7324	2,9053	5,40
Moyenne BG	7,543 (0,004)	7,698 (0,005)	2,889 (0,002)	/
Moyenne LHP+DLHM	7,57 (0,1)	7,73 (0,1)	2,902 (0,007)	/

Tableau 22 : Paramètres de maille de la mullite dans la pâte des échantillons archéologiques déterminées par la méthode de Rietveld avec Fullprof

Échantillon	Affinement de Rietveld				Affinement de Pawley			
	a (Å)	b (Å)	c (Å)	R-Bragg	a (Å)	b (Å)	c (Å)	R-Bragg
BG-01	5,081	8,726	9,391	1,414	5,097	8,723	9,415	0,018
BG-02 (brun)	5,088	8,733	9,390	3,003	5,087	8,713	9,403	0,032
BG-04 (brun)	5,089	8,775	9,412	1,407	5,096	8,755	9,427	0,020
BG-05	5,091	8,740	9,402	2,516	5,091	8,738	9,415	0,008
BG-06	5,104	8,747	9,413	1,988	5,101	8,744	9,423	0,008
BG-07	5,104	8,755	9,417	2,340	5,084	8,731	9,394	0,014
BG-08	5,094	8,763	9,411	1,794	5,093	8,745	9,414	0,007
BG-09	5,096	8,740	9,402	2,556	5,085	8,723	9,389	0,014
BG-10	5,087	8,754	9,405	1,523	5,088	8,741	9,410	0,012
BG-11 (brun)	5,104	8,782	9,428	1,267	5,103	8,756	9,428	0,013
BG-12	5,096	8,745	9,397	0,985	5,089	8,776	9,402	0,014
BG-13	5,092	8,734	9,396	4,201	5,091	8,735	9,416	0,021
BG-14	5,102	8,752	9,414	1,522	5,108	8,754	9,434	0,011
BG-15	5,091	8,752	9,392	1,252	5,088	8,725	9,402	0,020
BG-16	5,092	8,758	9,390	2,578	5,086	8,727	9,397	0,037
LHP-02 (brun)	5,080	8,777	9,417	1,030	5,092	8,742	9,386	0,057
DLHM-40 (brun)	5,100	8,746	9,415	1,165	5,105	8,739	9,398	0,023
BZ-01 (brun)	5,095	8,748	9,379	2,156	5,097	8,730	9,392	0,117
TZ-28 (brun)	5,085	8,775	9,436	0,967	5,100	8,756	9,418	0,016
TZ-28 (noir)	5,080	8,787	9,445	0,647	5,096	8,764	9,404	0,012
Moyenne	5,093 (0,008)	8,75 (0,02)	9,41 (0,02)	/	5,094 (0,007)	8,74 (0,02)	9,41 (0,01)	/

Tableau 23 : Paramètres de maille de la phase $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ dans la glaçure des échantillons archéologiques déterminées par les méthodes de Rietveld et Pawley avec Topas