

Zeitschrift:	Archives des sciences [2004-ff.]
Herausgeber:	Société de Physique et d'histoire Naturelle de Genève
Band:	70 (2018)
Heft:	1-2
Artikel:	La production médiévale du fer sur le Salève : nouveaux résultats
Autor:	Perret, Sébastien / Mélo, Alain / Soulignac, Raphaëlle
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-825741

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 31.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

La production médiévale du fer sur le Salève : nouveaux résultats

**Sébastien PERRET¹, Alain MÉLO², Raphaëlle SOULIGNAC¹
et Sandrine PARADIS-GRENOUILLET³**

I Résumé

Cet article propose un bilan d'une série de nouvelles recherches pluridisciplinaires, qui contribuent à une image substantiellement approfondie de la production médiévale de fer sur le Salève. De nouvelles campagnes de prospections basées sur l'exploitation de l'imagerie lidar ont permis d'élargir le corpus de sites sidérurgiques connus, et contribuent à redessiner le bassin de production du massif et à évaluer son impact sur le couvert forestier. De manière complémentaire à cette approche extensive, une microrégion de 25 ha riche en vestiges sidérurgiques a fait l'objet d'interventions archéologiques. Ils révèlent une situation relativement complexe du point de vue de l'organisation des sites et de la chronologie. Des fouilles dans un crassier ont permis de dégager, pour la première fois sur le Salève, des restes de bas fourneaux. Les datations obtenues sur le crassier font état d'une longue durée d'occupation, allant du IX^e au XIII^e-XIV^e siècle. L'étude des déchets de production met en évidence une technologie à basse température bien maîtrisée avec un bon rendement, ainsi qu'une grande continuité technologique. Des calculs de production suggèrent que les déchets du crassier représentent plus de 20 000 opérations de réduction, qui ont conduit à la production d'environ 80 tonnes de fer (avant épuration) sur toute la période d'activité. Une extrapolation des données à la microrégion conclut à une activité saisonnière mobilisant plusieurs personnes à plein temps, et suscite la question du contrôle et des débouchés de cette production. Son impact sur la forêt est abordé par une étude anthracologique, qui semble indiquer une évolution des modes de gestion des ressources boisées, sans pouvoir conclure à ce stade si elle traduit un choix délibéré ou une modification du couvert forestier.

Mots-clés: Salève, archéologie, période médiévale, paléométallurgie, fer, technologie

I Introduction

Depuis 2013, une série de nouvelles recherches s'articule autour de la production médiévale du fer du Salève, reconnue de longue date. Les sites métallurgiques de cette région font partie d'un ensemble de districts sidérurgiques de faible à moyenne importance qui ont vu leur essor à partir du haut Moyen Âge, dans un contexte de décentralisation de la production, dans de nombreuses régions où des ressources minières facilement exploitables étaient disponibles (Eschenlohr 2002; Leroy et al. 2000). Dans les régions limitrophes, les principaux districts productifs ont été, depuis les travaux paléométallurgiques pionniers au pied du Jura vaudois (Pelet 1993), étudiés de façon extensive (Eschenlohr 2001; Eschenlohr et Serneels 1991; Serneels 1993). Les recherches mises en place sur le Salève s'inscrivent dans leur continuité et doivent permettre de mieux

positionner ce district dans son contexte régional et d'aboutir à une compréhension approfondie et intégrée de la sidérurgie saléenne.

Ces nouvelles études font suite à une histoire de la recherche locale qui débute à la seconde moitié du XIX^e siècle. La première publication mentionnant la métallurgie du Salève signalait divers amas de déchets de réduction dans le secteur des Rochers de Favergé (Naville 1867). Plusieurs crassiers ont ensuite été localisés par les géologues lors de l'établissement de la première carte géologique du Salève (Joukowski et Favre 1913). Les travaux d'ouverture de la route de crête ont entraîné la découverte de nouveaux vestiges (Blondel 1944). Une quinzaine d'années plus tard, une première tentative de datation par le radiocarbone a été faite sur un site métallurgique de La Thuile (Armand et Maréchal 1960). Dans les années 1990, la sidérurgie du massif a fait

¹ Département de Géosciences, Université de Fribourg.

² Historien et archéologue, membre associé laboratoire Edytem – Université de Savoie.

³ Anthracologue, Eveha, membre associée Géolab UMR 6042 CNRS – Université de Limoges.

l'objet de plusieurs campagnes de prospection extensives (Mélo 1999) et d'une étude archéométrique importante portant sur du matériel issu d'une demi-douzaine de sites (Serneels 1993). Une série de nouvelles datations aboutissait à une première vision chronologique de la production du fer ancienne sur le Salève (Mélo 2001).

Ces recherches ont mis en évidence deux phases de production bien individualisées, remontant au haut Moyen Âge (V^e au VII^e siècle) et au Moyen Âge classique (X^e au XIII^e siècle). Des indices concordants suggéraient un possible lien entre les activités sidérurgiques tardives et l'établissement, en 1170, de la chartreuse de Pomier au pied du Salève (Mélo 2008). Les travaux archéométriques révélaient l'existence de deux grandes familles de scories sur le Salève. L'une comprend les scories grises denses (SGD), généralement écoulées à l'extérieur du bas fourneau, riches en fer, et caractéristiques des procédés de réduction anciens ; ces scories étaient associées au haut Moyen Âge. L'autre est celle des scories vitreuses noires (SVN), relativement pauvres en fer, qui témoignent d'une évolution de la technique de réduction mise en œuvre sur le Salève ; elles dataient toutes de la seconde phase. Cet assemblage évoque celui décrit pour certaines zones productives du Jura vaudois (Serneels 1993) ou central (Eschenlohr 2001).

En dépit d'une bonne vision globale de la métallurgie salévienne (cadre chronologique général, caractéristiques principales des vestiges des deux phases), de nombreuses questions importantes restaient ouvertes, portant principalement sur l'économie de la production, la technologie et ses évolutions, les datations, ainsi que la gestion des ressources boisées. Pour combler ces lacunes, les nouvelles recherches combinent des approches extensives (prospections) et ponctuelles (fouilles et sondages archéologiques),

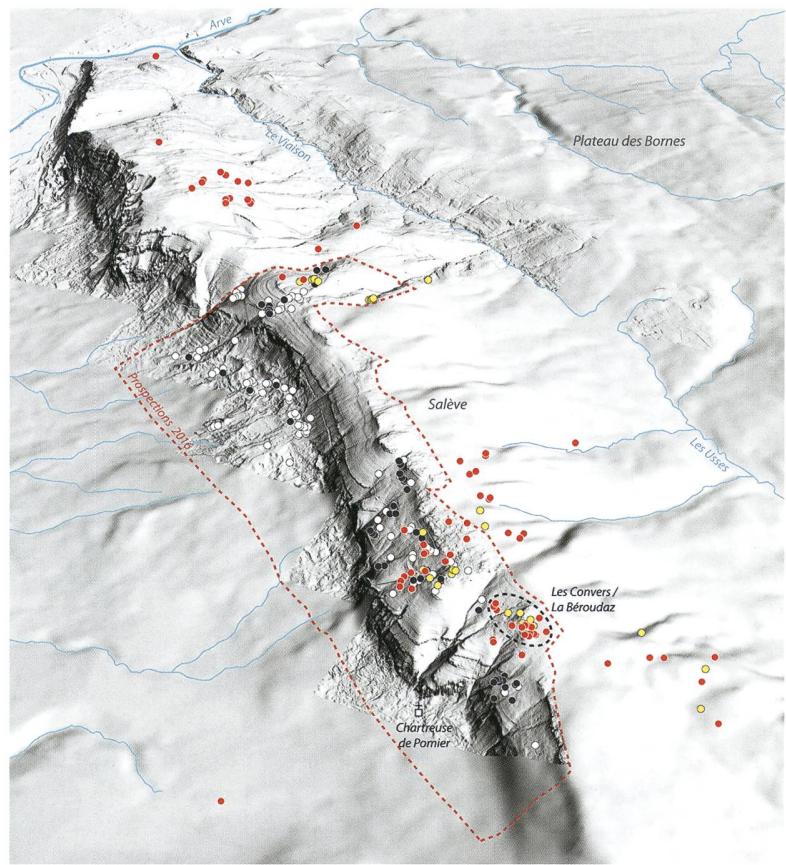


Fig. 1. Lidar du territoire du Grand Genève, avec projection de l'ensemble des vestiges sidérurgiques repérés à ce jour. En pointillé, l'extension de la zone des prospections 2016-2017. Points rouges: crassiers; points jaunes: minières; points noirs: charbonnières; points blancs: indices visités, négatifs.
Fond de plan et lidar © SITG 2015.

complétées par des études en laboratoire des matériaux échantillonnés sur le terrain, en croisant les données issues de champs disciplinaires et de méthodes variées (archéologie, archéométrie, histoire des techniques, télédétection, anthracologie, datations, géophysique). Cette contribution se propose de faire le bilan de ces travaux, dont certains volets sont encore en cours¹.

■ Les témoins de l'activité sidérurgique à l'échelle du massif

Les campagnes de prospection précédentes ont abouti à la constitution d'un corpus conséquent de données comprenant les indices miniers et les crassiers, les vestiges d'autres exploitations anciennes (fours à chaux, carrières), ou les traces de l'aménagement spatial (parcellaire, chemins, ruines). En 2015, la question du combustible nécessaire à la réduction du minerai de fer était abordée par le lancement d'un nouveau programme de prospection centré sur les charbonnières. Il combine la prospection pédestre

¹ Les recherches sur la métallurgie et la gestion de la « forêt métallurgique », achevées ou en cours, seront agrégées dans le cadre du nouveau PCR « Ecosystèmes montagnards du Moyen Âge à nos jours: trois cas haut-savoyards (Salève, Glières et Sales) » (voir Guffond, ce volume), permettant d'aborder ces questions dans un contexte élargi à d'autres industries et contextes montagnards.

avec des moyens de télédétection basés sur le lidar du territoire du Grand Genève, qui couvre la partie septentrionale du Salève². Cette approche combinée donne d'excellents résultats, permet de couvrir rapidement d'importantes surfaces, et est particulièrement bien adaptée aux problématiques des « forêts métallurgiques » (Georges-Leroy et al. 2011). Les microreliefs tels que ceux des charbonnières, des vestiges sidérurgiques (minières et crassiers) ou des fours à chaux sont souvent très nettement visibles, et permettent d'orienter les prospections pédestres. Les anomalies de terrain identifiées sur le lidar sont systématiquement vérifiées sur le terrain. Tous les sites confirmés ou repérés sur le terrain sont documentés et intégrés à un SIG. Après une première sélection en fonction de leur localisation écosystémique (orientation du versant, espace boisé ou ouvert, type actuel de forêt, altitude) ou de leur proximité avec d'autres artefacts humains (crassiers, fours à chaux, chemins...), des sondages à la tarière aident à identifier les charbonnières au potentiel le plus riche. Elles seront sondées ultérieurement dans le but de prélever des charbons de bois en contexte stratigraphique pour les études anthracologiques et les datations.

À ce jour, près de 80 crassiers ont été découverts et décrits, et de nombreuses zones d'extraction minière ont été identifiées et inventoriées (Fig. 1). Un nombre impressionnant de fours à chaux parsème les versants. Plus d'une centaine de plateformes ou de fosses de charbonnage ont été localisées. La mise en relation progressive de ces données permet d'esquisser peu à peu la morphologie du bassin de production sidérurgique et chaufournier, et d'aborder la question complexe de l'exploitation forestière en lien avec ces activités, qui peuvent se trouver en compétition pour des ressources boisées limitées.

I La zone des *Convers* et de *La Béroudaz*

Une zone de 25 ha au potentiel paléométallurgique particulièrement riche, aux lieux-dits des *Convers* et de *La Béroudaz*, situés à cheval sur les commu-

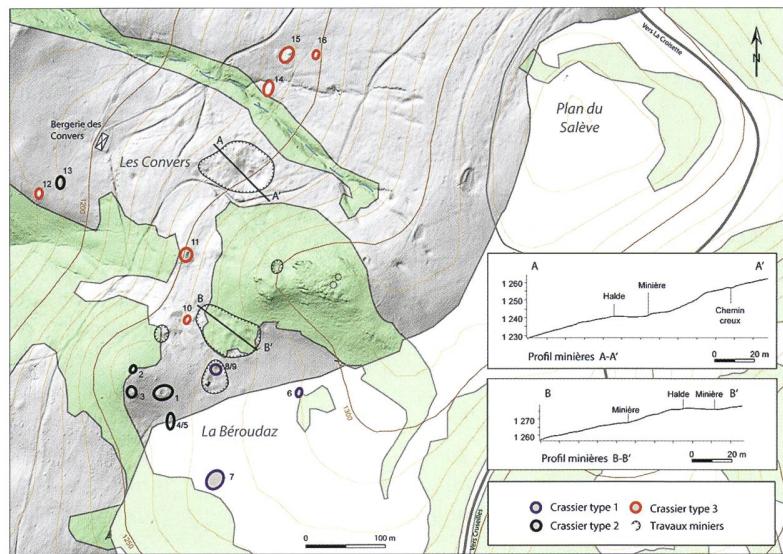


Fig. 2. Plan topographique de la zone des *Convers* et de la *Béroudaz*, avec le relevé des vestiges liés à la sidérurgie (minières, crassiers). On distingue trois types de crassiers, en fonction des proportions des scories denses (SGD) et vitreuses (SVN). Type 1: que SGD (haut Moyen Âge), type 2: SGD > SVN, type 3: SVN > SGD.

nes de Présilly et de Cruseilles, a été choisie pour une étude à une échelle plus réduite (Fig. 2). Les sites métallurgiques se trouvent à une altitude comprise entre 1200 et 1300 m. L'environnement actuel est caractérisé par des pâturages et une formation forestière de type hêtre sapinière. Six datations radiocarbone faites lors de campagnes de prospections précédentes montrent que les deux phases de production médiévale sont représentées (Mélo 2001). La concentration de sites sidérurgiques de plusieurs périodes offre la possibilité de suivre l'évolution de cette industrie tant du point de vue socio-économique que technologique, notamment en affinant la chronologie et en adoptant une approche quantitative rigoureuse.

La zone étudiée se distingue par des travaux miniers importants (minières en entonnoir, haldes), ainsi que de nombreux crassiers (Joukowski et Favre 1913; Serneels 1993). Les minières exploitent des concrétions ferrugineuses scoriacées associées aux grès du Sidérolithique, qui remplit des fissures et cavités d'origine karstique. Sur la partie sommitale du Salève, le Sidérolithique comble généralement les surfaces d'érosion qui affectent la formation des calcaires urgoniens, mais dans la zone étudiée, les calcaires urgoniens ont été complètement démantelés et le Sidérolithique repose directement sur les calcaires de faciès «Pierre jaune de Neuchâtel» du Hauterivien inférieur sous-jacent (Charollais et al. 1988). La disponibilité de gisements d'un minerai de très bonne qualité dans ce secteur explique l'installation des nombreux sites de production du fer.

² Le relevé lidar comprend une densité de 5 impulsions laser/m², avec au minimum 2 points/m² au sol sous couvert forestier. Le MNT généré a une maille de 50 cm et a été intégré à un système d'information géographique (SIG).

Une prospection pédestre a permis de cartographier l'ensemble des vestiges. Les minières et les crassiers les plus tardifs du Salève forment des reliefs bien exprimés et immédiatement reconnaissables. Les crassiers les plus anciens, remontant au haut Moyen Âge, sont beaucoup plus arasés, peut-être parce qu'ils ont subi une érosion plus importante, et ne se distinguent, dans les paysages actuels, que par la présence de scories éparses. Une description qualitative systématique des résidus métallurgiques des différents crassiers a permis de distinguer trois assemblages caractéristiques de scories, témoignant d'un contexte techno-historique plus complexe qu'anticipé: les sites de la première phase de production ne comportent que des scories denses (SGD, 4 sites), tandis que ceux de la seconde phase comportent des scories denses et vitreuses (SGD et SVN) en proportions variables, avec un assemblage à prédominance de scories denses (6 sites), et un autre à prédominance de scories vitreuses (6 sites). Les sites avec la plus importante proportion de scories vitreuses (SVN) se trouvent tous dans la zone des *Convers*. Cela suggère une différenciation (évolution?) technologique avec déplacement de la production. Des fragments de minerai ont été prélevés et étudiés en laboratoire (ci-après). On ne distingue aucune particularité des gisements de minerai qui pourrait expliquer cette répartition spatiale.

Aucun témoin des possibles activités sidérurgiques annexes, par exemple ceux en lien avec la préparation du minerai (concassage ou grillage) ou le traitement des masses brutes de fer (épuration dans des foyers de type forge), n'est visible en surface; ceux-ci étant comblés par des colluvions. Pour repérer ces vestiges plus discrets et placer cette industrie dans son contexte archéologique plus large, une campagne de prospection géomagnétique a porté sur une surface de 1,3 ha, couvrant une large partie de la zone exploitée par les métallurgistes à *La Béroudaz*. Les relevés ont été fait à l'aide de magnétomètres à vapeur de césum Geometrics G858 montés en gradiomètre en mode axial. Cette configuration permet de s'affranchir des mesures de variations temporelles du champ magnétique, et est couramment utilisée en contexte archéologique. Les relevés ont été obtenus en suivant des parcours parallèles espacés d'un mètre, en prenant dix mesures par seconde.

Les contours des crassiers sont nettement visibles sur les magnétogrammes (Fig. 3), ce qui permet de les délimiter même lorsqu'ils sont recouverts par des sédiments. Les résultats sont particulièrement intéressants pour les crassiers du haut Moyen Âge (crassiers 6 et 7), presque invisibles en surface, mais dont on distingue nettement l'extension (étonnement importante) ainsi que la position probable des bas fourneaux (zones les plus contrastées). À proximité du crassier n° 1, plusieurs anomalies magnétiques, caractérisées par des contrastes importants, ont donné lieu à des sondages archéologiques qui ont notamment permis d'identifier un foyer vraisemblablement en lien avec les activités métallurgiques (ci-après).

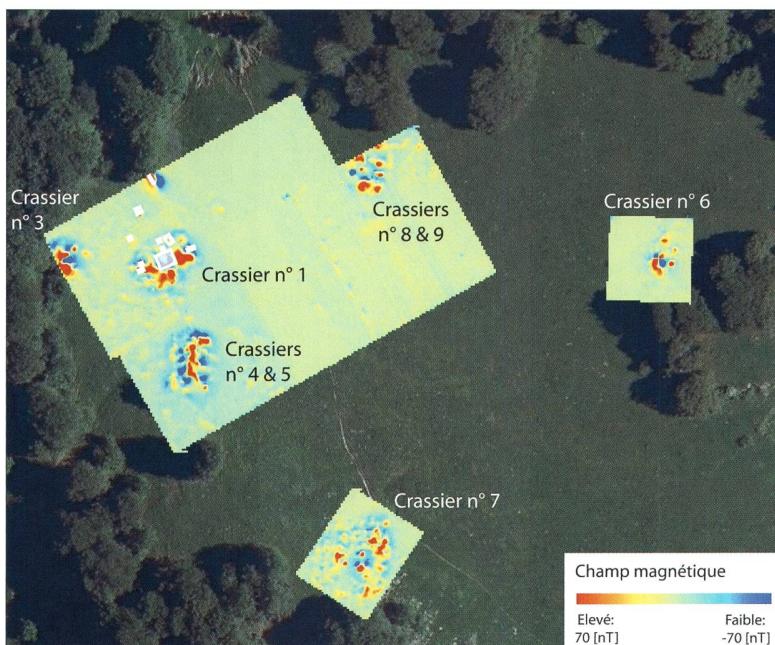


Fig. 3. Relevés géomagnétiques. On distingue nettement l'extension des crassiers, qui sont partiellement recouverts par des colluvions (les crassiers 6 et 7 sont invisibles en surface). Des anomalies géomagnétiques (zones fortement contrastées) repérées autour de la zone fouillée au centre du crassier n° 1 ont donné lieu à plusieurs sondages (en blancs). Relevés géomagnétiques Ludovic Baron. NT: Orthophotographies © IGN 2015.

Interventions archéologiques

Les approches privilégiées jusque-ici sur le Salève (prospections systématiques, analyses archéométriques ponctuelles, historiographie) permettent de brosser le tableau général de la production du fer. Des interventions archéologiques sont cependant indispensables pour repérer et comprendre les bas fourneaux, caractériser les technologies, reconstituer la chaîne opératoire de la production, ou encore pour quantifier la production. Dans cette optique, trois campagnes de sondages et de fouilles ont eu lieu entre 2013 et 2015. Elles sont

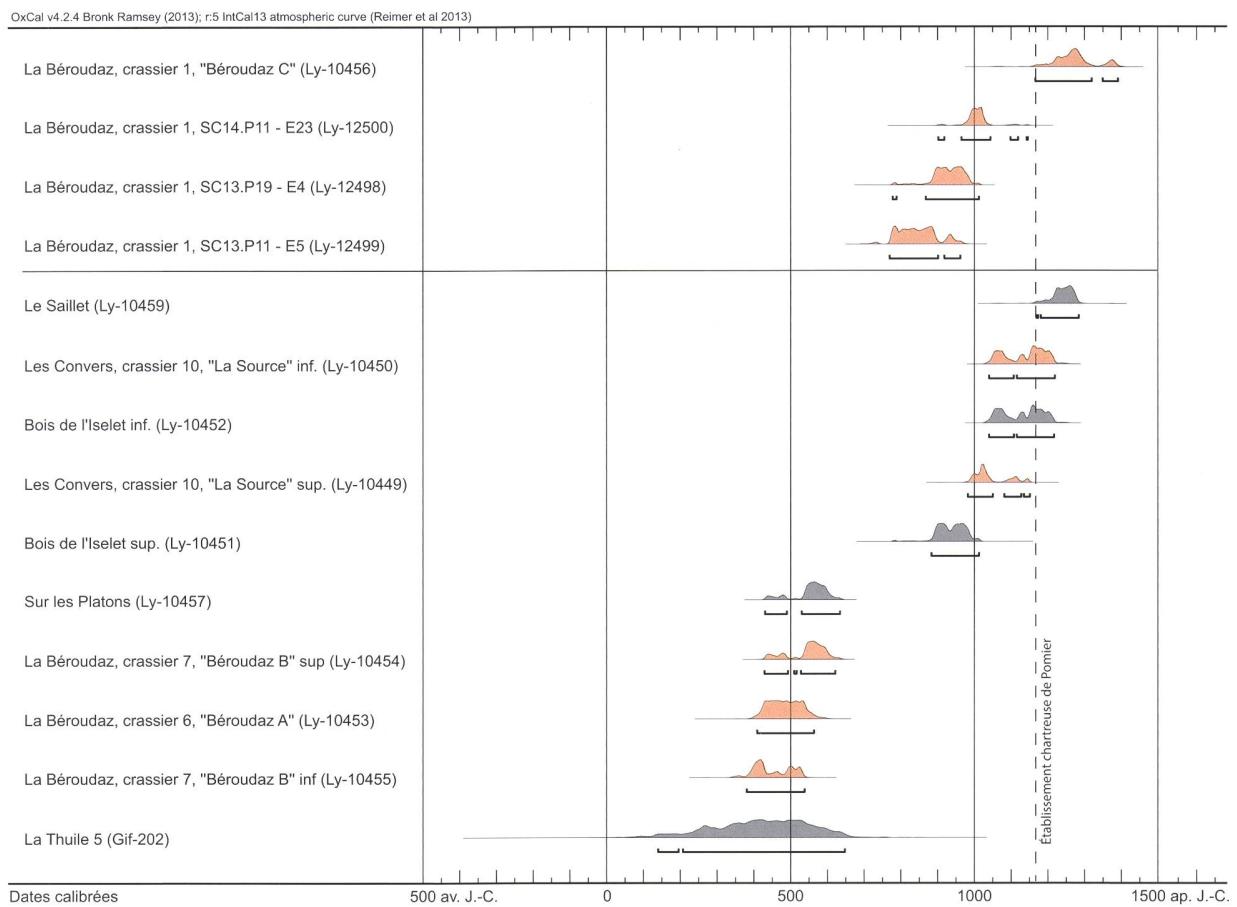


Fig. 4. Liste de l'ensemble des datations par radiocarbone disponibles pour la métallurgie du fer du Salève. En haut, les datations du crassier n° 1. Les datations concernant *Les Convers* et *La Béroudaz* sont indiquées en rouge. La date d'installation de la Chartreuse de Pomier est indiquée par une ligne pointillée, et montre que lors de l'établissement de l'ordre, les activités sidérurgiques étaient déjà pleinement en place sur le Salève.

complétées par des études annexes portant sur les vestiges métallurgiques (archéométrie), le charbon de bois (anthracologie) et le mobilier archéologique, ainsi que de nouvelles datations radiocarbone.

La séquence stratigraphique du crassier n° 1

Les interventions archéologiques étaient centrées sur le crassier n° 1, situé au nord du pâturage de *La Béroudaz*, sur une terrasse en bas de pente qui laissait présager de bonnes conditions de conservation. Cet amas a une forme d'anneau ouvert vers le nord, assez atypique dans le contexte du Salève. Une datation radiocarbone faite dans le cadre d'un programme de prospection plus ancien le datait du XIII^e ou XIV^e siècle (Ly-10456, Fig. 4). Comme pour les autres sites appartenant à cette phase chronologique, l'assemblage des scories comporte à la fois des scories grises denses (SGD) et vitreuses (SVN), généralement coulées, montrant qu'elles étaient évacuées par un orifice aménagé dans la porte pendant l'opération.

Les fouilles ont permis de dégager complètement l'aire de travail située au centre de l'anneau formé par les déchets métallurgiques. La circonference externe du crassier est d'environ 20 sur 30 m, pour une épaisseur qui atteint près de 2 m (Fig. 5). Dans l'aire centrale, nous avons pu mettre au jour la base d'un bas fourneau conservé sur une hauteur de 40 cm (bas fourneau BF1), qui appartenait vraisemblablement à la dernière phase de travail avant abandon du site. Les scories étaient rejetées à proximité immédiate de l'appareil, de telle sorte que la bordure du crassier a fini par joindre la cheminée. L'espace de travail dégagé devant la porte du bas fourneau a rétréci jusqu'à atteindre moins d'un mètre, ce qui devait compliquer l'accès à la porte ; de toute évidence, cet espace suffisait toutefois pour l'écoulement des scories (Fig. 6). En raison de ces écoulements successifs, le sol argileux devant la porte a été cuit en surface. Sous et autour du bas fourneau, l'argile beige du paléosol montre un gradient passant du violacé à la rubéfaction marron, sur une épaisseur allant de 10 à 30 cm, indiquant un impact thermique assez important.

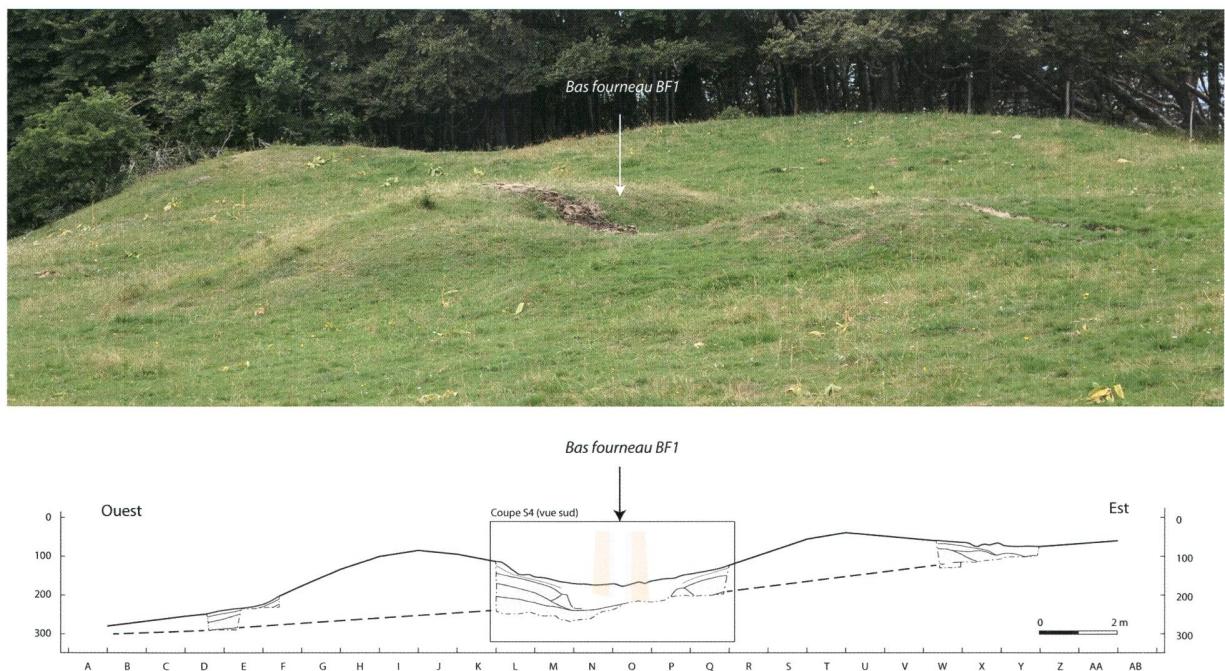


Fig. 5. Vue du crassier n° 1. En bas, le profil est-ouest. Le paléosol est indiqué par un pointillé rouge.

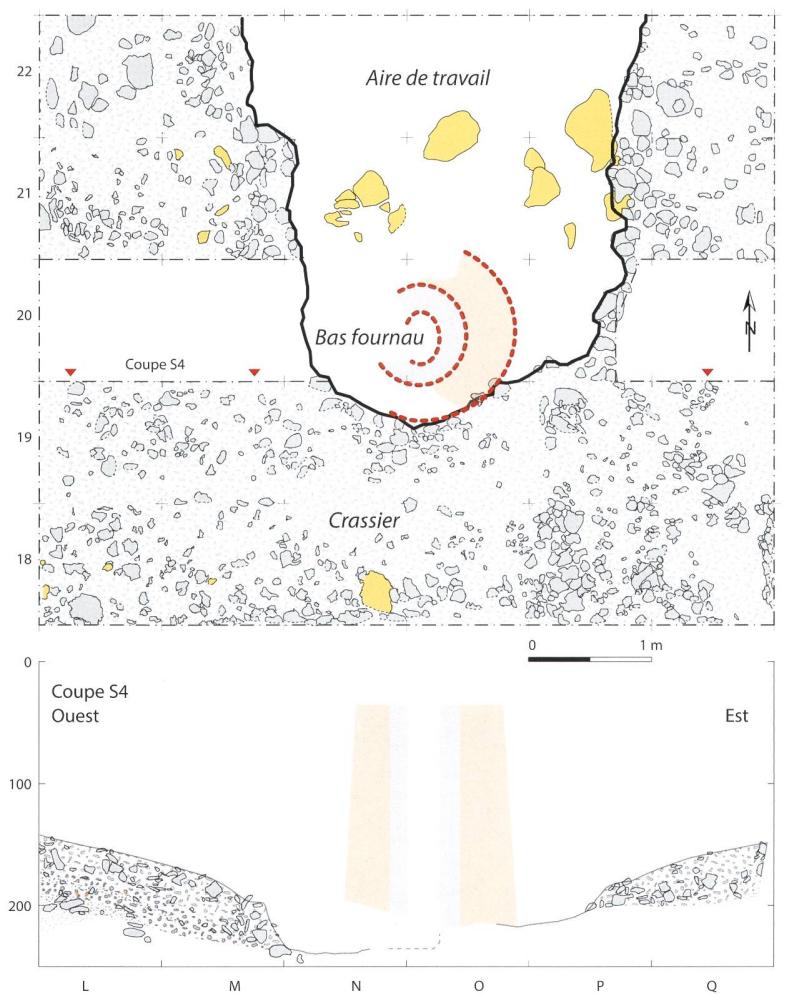


Fig. 6. Organisation de l'aire centrale (L-Q18-22) de l'amas de scories 1, état au moment de l'abandon du site. En bas, résumé de la coupe S4. Reconstitution hypothétique et schématique du bas fourneau BF1. On peut noter que les métallurgistes ne disposaient que d'une surface très réduite devant la porte du bas fourneau, située à l'ouest de celui-ci. Plan établi à partir d'orthophotos. DAO Clémentine Gautier, Mélissa Morel, Elliott Sadourny, Hélène Crochet.

Des relevés stratigraphiques implantés dans l'amas permettent de reconstituer l'histoire dépositionnelle complexe du site, marqué par une succession de phases d'activités sidérurgiques entrecoupées par des phases d'abandon plus ou moins prolongées. L'amas est constitué de lentilles de rejets de scories, de matériaux de construction, et de couches charbonneuses (Fig. 7). À la base de la séquence stratigraphique se trouve une couche charbonneuse compacte qui recouvre, à l'ouest, la glaise partiellement rubéfiée du paléosol, montrant

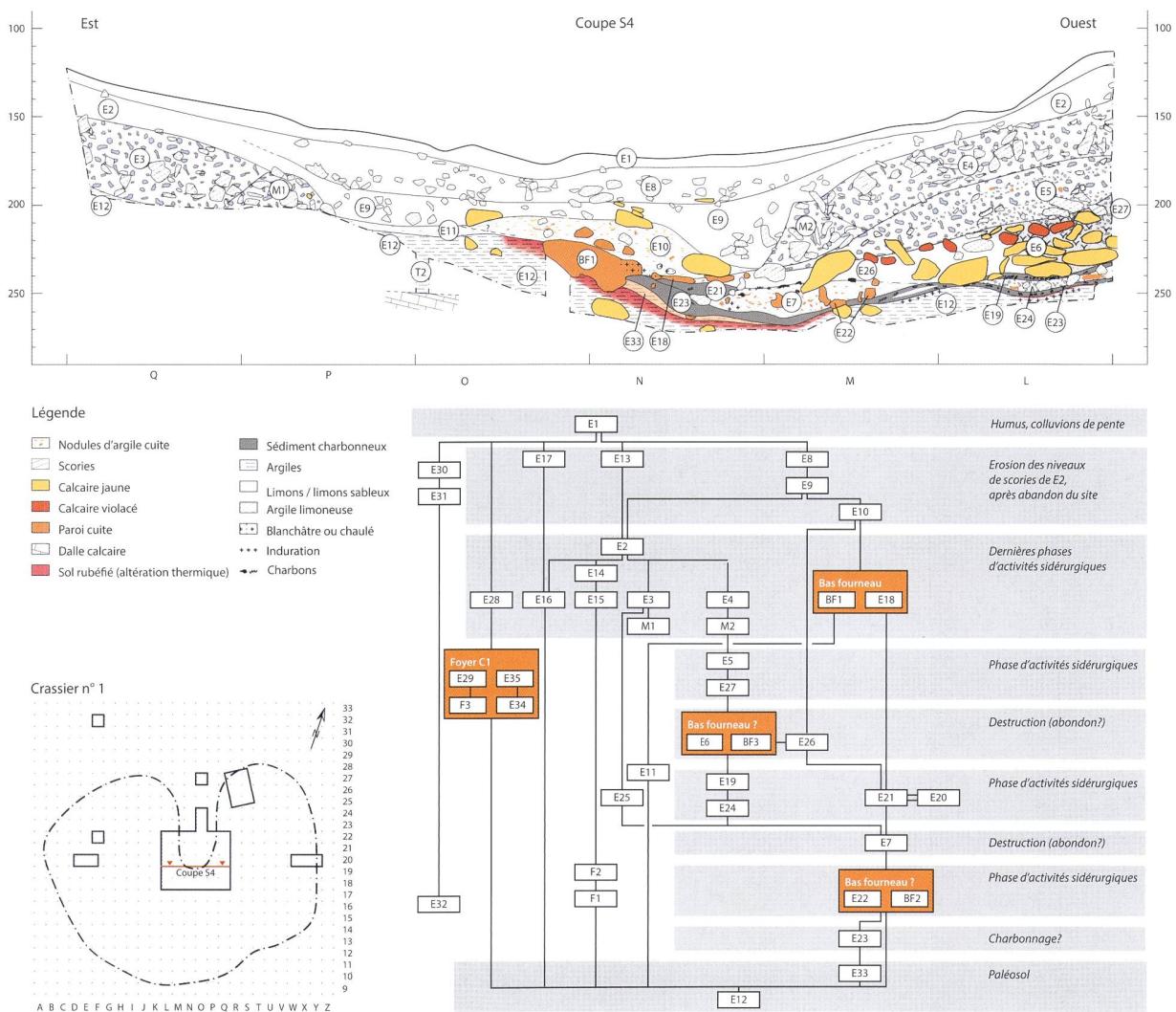


Fig. 7. Coupe stratigraphique de référence S4 (L-Q19/20), établie dans un axe est-ouest et coupant marginalement le bas fourneau BF1 au centre de l'anneau formé par les déchets. Les principaux ensembles stratigraphiques mentionnés dans le texte sont reportés sur la coupe. Les ensembles E1 et E8-E10 sont des couches d'érosion/comblement après abandon du site. En bas: synthèse de la séquence stratigraphique, mettant en évidence les principales phases d'activité et d'abandon. DAO Isabelle André.

que celui-ci a été chauffé. Cela pourrait témoigner d'une première plateforme de charbonnage, exploitée avant même, ou en vue de la construction du premier bas fourneau. Au même niveau stratigraphique, on identifie aussi les restes très ténus de ce qui semble être un premier bas fourneau, auquel adhère encore une grande scorie interne (BF2, ensemble E22). Un peu plus haut dans la séquence, un niveau constitué de dalles calcaires jointives est probablement issu du démantèlement de la cheminée d'un autre bas fourneau, d'âge intermédiaire (BF3, ensemble E6). Les couches sommitales de l'amas, de part et d'autre de l'aire de travail (ensembles E3 et E4), sont constituées d'un niveau de rejet de scories qui marque la dernière phase de travail, et qui est probablement associé au bas fourneau BF1, le plus récent. Au regard de la sur-

face restreinte du sondage dans le crassier, il est vraisemblable que celui-ci renferme les restes d'autres bas fourneaux encore; le relevé magnétique ne livre malheureusement pas d'indications univoques, sans doute parce que le signal est fortement perturbé par l'épaisse couche de scories.

Notons, sans entrer dans les détails dans le cadre de cet article, la présence systématique, dans tous les niveaux basaux du site et mélangés aux déchets sidérurgiques, de témoins d'occupations plus anciennes, datant de la fin de la préhistoire (industrie lithique appartenant essentiellement au mésolithique final) et de l'antiquité tardive (céramiques du I^{er} au III^e siècle). Ces vestiges se trouvent probablement en position secondaire, et ont été apportés ou remaniés par les colluvions qui recouvrent la terrasse sur la-

quelle le crassier a été établi. Ces vestiges montrent que le sommet du Salève a été occupé par les derniers chasseurs-cueilleurs, sans doute comme halte de chasse, ainsi que les gallo-romains, probablement dans un contexte de bergerie.

Datations

Trois nouvelles datations complètent le corpus existant (Fig. 4). Elles ont été obtenues par spectrométrie de masse par accélérateur (AMS), sur des prélèvements de charbon de bois provenant des niveaux supérieurs (ensemble E4), intermédiaires (E5) et inférieurs (E23)³. Ces nouvelles datations couvrent la période de la fin du VIII^e jusqu'au milieu du XII^e siècle. Le charbon issu de la base de la stratigraphie est cependant problématique, car il a livré la date la plus récente, alors qu'elle devrait être la plus ancienne ; nous n'avons pour l'instant pas d'explication satisfaisante pour cette inversion. On peut par ailleurs se demander comment ces trois nouvelles dates s'articulent par rapport à la datation Ly-10456, bien plus tardive. Cette dernière avait été obtenue sur un charbon récolté dans un sondage à une profondeur de 40 cm, dans la partie externe du crassier (Mélo 2001) ; malheureusement, nous ne sommes pas en mesure de faire le lien stratigraphique entre ce sondage et les nouvelles coupes stratigraphiques.

Ces difficultés montrent à quel point il peut être difficile d'établir la durée de fonctionnement d'un site métallurgique, même lorsque celui-ci présente une configuration relativement simple. L'évaluation de cette durée a bien entendu un impact important sur les calculs de la production annuelle. En l'absence de datations complémentaires, la chronologie du site reste à préciser. Elle semble cependant couvrir une période remarquablement longue s'étalant sur plusieurs siècles.

Avec ces nouvelles dates, il apparaît désormais clairement que le début des activités métallurgiques de la seconde phase de production remonte à la période carolingienne, avec trois dates (dont deux du crassier n° 1) situées entre le IX^e et le X^e siècle. À cette aune, il convient de rediscuter de la relation entre les Chartreux et les activités sidérurgiques. Lors de

la fondation de la chartreuse de Pomier, la production du fer était déjà fermement établie depuis plusieurs siècles, dans plusieurs zones, incluses celles des *Convers* et de *La Béroudaz*. Nous ne savons pas qui contrôlait alors cette production (droits de propriété des terres, statut des artisans...), ni vers où et à quel compte elle était écoulée. Les Chartreux ont-ils intégré le système de production existant, ainsi que l'indiquent certains indices (Mélo 2008) ? Il reviendra aux recherches futures de montrer si leur arrivée s'est accompagnée d'une modification des dynamiques de production, qui pourrait indiquer que la sidérurgie a été intégrée dans l'économie du monastère. Du point de vue de la technologie, aucune rupture n'est discernable à ce stade de nos connaissances.

Un bas fourneau à tirage naturel ?

Le bas fourneau BF1, bien qu'incomplètement préservé, permet d'en restituer les principales caractéristiques (Fig. 8). Sa section interne est légèrement ovale, avec des diamètres longitudinaux et latéraux de respectivement 25 et 35 cm. La paroi est très fortement indurée sur une vingtaine de centimètres d'épaisseur, indiquant des températures soutenues. Sur la face interne, on observe les traces d'une chape argileuse vitrifiée aux reflets bleutés ou blanchâtres. De la partie externe de la paroi ne subsistent plus qu'une ou deux assises de grosses dalles calcaires, conservées sur une hauteur de 10 à 15 cm, à l'arrière de la structure. Localement en contact avec la paroi cuite subsistante, ces dalles ont été altérées par la chaleur et ont une teinte violacée. Entre les dalles et contre la partie indurée de la paroi, on observe les traces d'une matrice argileuse rouge pulvérulente ; la limite entre la partie indurée et la partie pulvérulente est très marquée, suggérant que le revêtement externe ait été aménagé après la cuisson de la paroi interne. En tenant compte des assises calcaires, l'épaisseur totale de la paroi de la cheminée devait comprendre entre 50 et 70 cm, et fournissait une isolation thermique parfaitement satisfaisante.

La base de la cheminée est conservée sur les trois quarts de son pourtour ; le quart sud-ouest n'est plus en place. La porte s'ouvre à l'ouest, et était probablement haute de 25 cm ; sa largeur n'est pas connue avec précision, mais n'excédait pas 30 cm. Elle permettait de laisser s'écouler la scorie et de vider le fourneau. Pendant l'opération de réduction, elle devait être partiellement fermée. Certaines scories internes avec des cordons d'écoulements montrent qu'on a dû garder une ouverture haute d'environ 5 cm afin de permettre aux scories de s'écouler, et peut-être également pour ventiler le bas fourneau. Le système d'aération de cette structure reste in-

³ Les datations ont été effectuées par le Centre de datation par le radiocarbone de l'Université Lyon I (Christine Oberlin). Pour les deux charbons récoltés dans les niveaux les plus récents, provenant de hêtres (*Fagus sylvatica*), la partie la plus externe a été isolée pour les datations après examen des cernes. Néanmoins, en l'absence d'écorce, il n'est pas possible de garantir que ces cernes datent exactement la période d'abattage des arbres. Le charbon provenant du niveau le plus ancien, d'essence indéterminée, comprenait l'écorce.

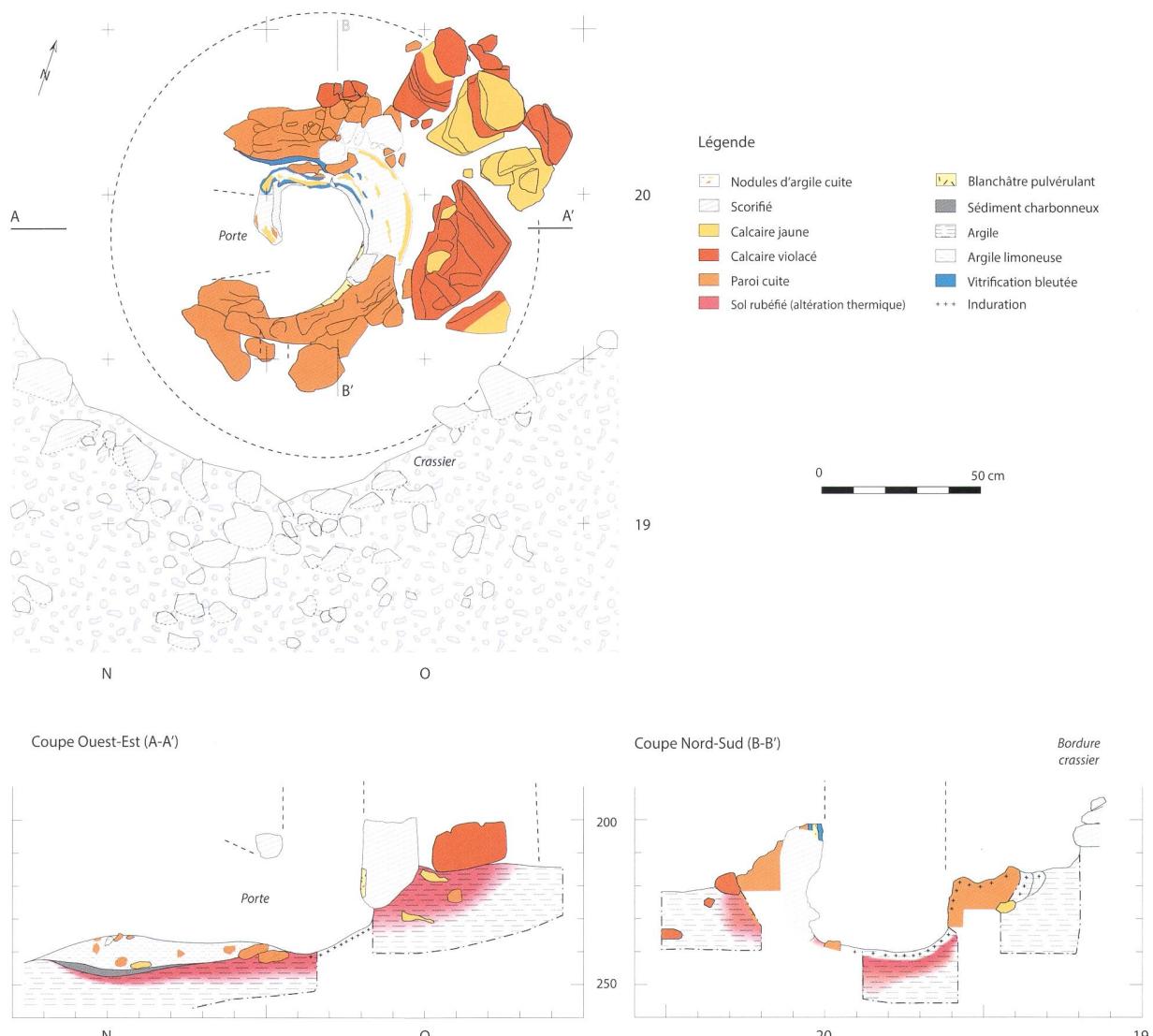


Fig. 8. Le bas fourneau BF1 en plan et en coupe. À l'ouest, un fragment de la porte était préservé. À l'arrière, quelques assises de dalles calcaires marquent la limite externe de la base de la cheminée.

connu. Nous n'avons pas identifié d'orifice d'aération, mais la paroi n'est pas suffisamment conservée pour pouvoir aborder la question de leur emplacement. On remarque une asymétrie marquée dans l'altération des parois (la paroi latérale nord est nettement plus indurée que la paroi sud), qui pourrait résulter d'une aération latérale, par une tuyère insérée dans la partie sud de la cheminée; ce serait alors une bonne indication d'une ventilation forcée. D'un autre côté, nous n'avons trouvé que quelques très rares fragments de tuyères lors de la fouille, et au regard du nombre non significatif, il est clair qu'elles n'ont pas pu être utilisées de manière habituelle dans le processus de réduction; peut-être ont-elles appartenu à un foyer d'épuration. À ce stade, une ventilation par tirage naturel (sans soufflets) ne peut en tout cas pas être exclue.

De fait, ce bas fourneau présente plusieurs caractéristiques qui rappellent tout particulièrement les appareils à tirage naturel de type *Quiquerez* contemporains qui ont été documentés dans le Jura central suisse (Eschenlohr 2001; 2011; Quiquerez 1992[1866]): diamètre interne d'une trentaine de centimètres, paroi interne fortement scorifiée opposée à un revêtement externe meuble, utilisation de dalles calcaires pour consolider la cheminée (Fig. 9). L'hypothèse d'une filiation avec le type jurassien semble donc plausible. Au regard du mode de construction des bas fourneaux de type *Quiquerez*, qui intègre généralement un parement assez serré de matériaux rocheux, on peut cependant s'étonner de l'absence d'une forte concentration, autour de BF1, de dalles calcaires qui devrait résulter de l'effondrement de la cheminée. Cela témoigne peut-

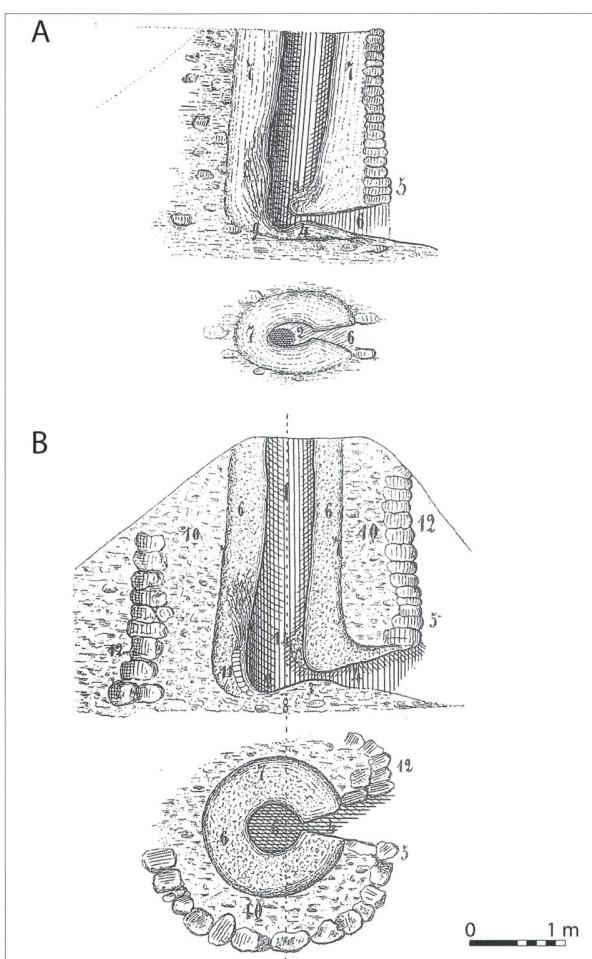


Fig. 9. Deux exemples de bas fourneau de type Quiquerez (Quiquerez 1992[1866]).

être d'une variation locale de l'architecture; en raison de l'état incomplet de l'appareil excavé, nous ne sommes pas en mesure de proposer une reconstitution de la superstructure.

Pour terminer, il faut noter que la scorie interne accolée à la paroi du bas fourneau BF2, vraisemblablement en place à la base du crassier (voir ci-dessus), avait un diamètre de presque 40 cm, et ne s'est donc vraisemblablement pas formée dans un appareil du type décrit ici. Bien que BF2 ne soit quasiment pas préservé, nous devons conclure qu'il avait un diamètre interne plus important que BF1. Cette apparente modification de l'architecture ne s'accompagne pourtant pas d'une évolution notable des scories, qui semblent remarquablement stables du point de vue de leur pétrographie (voir ci-après).

⁴ Dans d'autres niveaux qui ont fait l'objet d'un tri, ce pourcentage est nettement inférieur, voir nul. Pour les niveaux antérieurs à E5 (ensembles E6, E7 etc.), ces chiffres ne sont pas connus. Nous ne sommes donc pas en mesure de dire si des scories de ce type sont propres à l'ensemble E5 ou si elles se retrouvent dans toute la séquence inférieure.

Bas foyer

En marge du crassier, une structure de combustion (foyer C1) était recouverte par une couche de scories s'amenuisant et appartenant soit à la dernière phase de travail, soit issue de l'érosion de l'amas, de telle sorte que nous ne savons pas si le foyer pouvait fonctionner jusqu'à la fin de l'exploitation du site. Le foyer couvre une surface d'environ 50 sur 130 cm, et est installé sur le paléosol argileux. L'argile a été altérée par l'impact thermique, et on observe des rubéfactions beiges à violacées. Dans sa partie nord, le foyer forme une cuvette avec un diamètre de 50 cm et profonde de 15 cm comportant, dans son fond, quelques petites dalles calcaires qui ont subi un début de calcination; la cuvette était remplie d'un sédiment limoneux noirâtre avec de nombreux charbons. Quelques rares blocs calcaires décimétriques altérés par la chaleur bordaient la zone de combustion. En dessus du niveau argileux, mais en particulier au sud de la structure, on observe un fin niveau très riche en charbon de bois. La position topographique et stratigraphique du foyer suggère un lien avec les activités sidérurgiques. On peut envisager l'utilisation d'un des blocs de calcaires comme enclume, mais il devrait alors être associé à une concentration de battitures, ce qui n'a pas été le cas. Des prélèvements de sédiments permettront peut-être de formuler des hypothèses plus solides. En attendant, la nature précise du foyer reste indéterminée.

Épuration du fer brut

La fouille a livré une dizaine de scories en forme de calottes plano-convexes (Fig. 10a), qui sont les résidus caractéristiques des activités post-réduction (épuration des éponges de fer brut extraites du bas fourneaux, forgeage). Elles proviennent presque toutes de l'ensemble stratigraphique E5, où les scories en calottes et ferreuses composent près de 10% du poids des déchets⁴. Leur composition et leur forme sont liées au travail effectué (Serneels et Perret 2003). Bien que l'échantillonnage soit faible et non représentatif, on constate une certaine homogénéité dans l'assemblage. Les calottes ont une forme plus ou moins ovale, une section légèrement biconvexe ainsi qu'une faible épaisseur. Les surfaces supérieures sont généralement plus ou moins planes, et on y observe quelques empreintes de charbon de bois. L'irrégularité des surfaces inférieures montre qu'elles se sont formées sur un lit de charbons de bois ou sur un sol argilo-sableux, qui adhèrent parfois encore. Les teintes varient du gris sombre au gris rougeâtre; on observe également quelques plages qui paraissent corrodées, mais à l'exception de deux calottes très ferreuses, elles ne réagissent



Fig. 10. Produits liés aux opérations d'épuration de l'éponge. A: Scories en forme de calottes plano-convexes. On remarque une grande homogénéité. B: Exemples de battitures sphériques (gauche), irrégulières (centre) et lamellaires (droite) récoltées dans les sédiments du crassier.

pas à l'aimant. Ces pièces montrent qu'on a traité, au moins au cours de certaines phases de production, les éponges produites sur place dans un bas foyer, soit pour un travail d'épuration (expulsion des inclusions de scories et compactage), soit pour fabriquer des préformes.

La présence de battitures confirme cette interprétation. Les battitures sont des micro-résidus comprenant de fines croûtes d'oxydes de fer ou des petites gouttelettes de scorie liquéfiée, qui sont expulsées lors du martelage. Généralement, ces résidus se retrouvent en concentrations significatives autour des enclumes. Toutefois, en raison de leur faible taille, ils sont facilement remaniés. Des expérimentations ont montré que les deux types de battitures (sphériques et lamellaires) se forment lors du compactage d'une éponge; plus le fer est épuré, plus les battitures lamellaires sont majoritaires (Crew 1988; de Rijk 1994). Nous avons réalisé une dizaine de prélèvements de sédiments dans les différents ensembles stratigraphiques, séparé les fractions dans une colonne de tamisage, prélevé les micro-résidus à l'aide d'un aimant en néodyme, et trié ces résidus en fonction de critères morphologiques. Il apparaît que la plupart des sédiments contiennent les deux types de micro-résidus (Fig. 10b). Il est très vraisemblable que ce matériel ait été formé lors du traitement des éponges de fer brut produites dans les bas fourneaux. Plusieurs prélèvements ont livré des battitures lamellaires très régulières avec deux surfaces planes. Cela pourrait indiquer que le produit fini était relativement bien épuré.

■ Analyse des matériaux et reconstitution technologique

Un ensemble de 68 échantillons métallurgiques représentatifs a fait l'objet d'une étude archéométrique en laboratoire. Il est composé de 20 fragments de mineraï, de 2 grès ferrugineux, de 4 morceaux de paroi de four et de 42 scories denses et vitreuses (19 SGD et 23 SVN). Les scories, les fragments de

paroi de four ainsi que 9 fragments de mineraï ont été prélevés en 2013 *in situ* dans plusieurs ensembles stratigraphiques du crassier n° 1; les autres morceaux de mineraïs ont été récoltés dans différentes minières ou haldes des *Convers* (6 individus) et de *La Béroudaz* (5 individus). Une partie de chaque échantillon a été broyée pour les analyses chimiques et minéralogiques. Pour l'analyse microscopique, 10 lames minces polies ont été confectionnées, comprenant 7 scories (5 SGD et 2 SVN) ainsi que 3 morceaux de mineraï.

Des analyses chimiques globales semi-quantitatives ont été obtenues par fluorescence des rayons X (WD-XRF) avec un spectromètre Philips PW2400 couplé à un programme d'analyse Uniquant. Pour la minéralogie, les mesures de diffraction des rayons X (XRD) ont été faites avec un diffractomètre Philips PW1710, tube Cu avec monochromateur en graphite. Les lames minces ont été étudiées à l'aide d'un microscope métallographique Olympus utilisé en lumière transmise et réfléchie. Toutes les analyses chimiques sont données en %-poids en base anhydre normée à 100% (Tab. 1).

Le mineraï

Le mineraï exploité sur le Salève se présente généralement sous forme de concrétions d'hydroxydes de fer constituant parfois des croûtes épaisses de plusieurs centimètres, qui se sont formées par altération du quartz ferrifère du Sidérolithique. Les échantillons analysés montrent généralement des surfaces de fracturation, témoignant de leur abattage et préparation. Ils ont été sélectionnés en raison de leur densité apparente, laissant supposer une teneur en fer importante. Les surfaces sont parfois scoriaçées ou mamelonnées. A l'œil et au microscope, on observe une structure en bandes, allant du brun-orangé au rouge-violacé, ainsi que de fins litages de quartz. L'aspect macroscopique et les spectres de diffraction montrent qu'ils sont essentiellement constitués de goethite, de forme FeO(OH) , et le quartz est toujours présent en quantité variable (Fig. 11a). Dans quelques cas, on identifie la présence d'héma-

Échantillon	Description	Site	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _{tot}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
SC302	Minerai	Convers, site 40	11,80	0,02	5,24	81,14	0,80	0,24	0,11	0,03	0,14	0,33
SC306	Minerai	Convers, site 40	17,03	0,05	2,15	79,61	0,25	0,25	0,14	0,06	0,25	0,11
SC313	Minerai	Convers, site 41	8,27	0,08	4,80	84,68	0,09	0,16	0,10	0,05	0,20	1,25
SC317	Minerai	Béroudaz, site 33	6,79	0,05	4,85	87,02	0,29	0,16	0,10	0,04	0,21	0,21
SC318	Minerai	Béroudaz, site 33	2,38	0,00	5,56	90,49	0,09	0,09	0,13	0,03	0,02	0,70
SC320	Minerai	Béroudaz, site 33	8,14	0,04	1,62	88,89	0,39	0,20	0,11	0,05	0,25	0,18
SC321	Minerai	Béroudaz, site 2	14,38	0,17	4,17	78,93	0,03	0,24	0,15	0,06	0,31	1,18
SC326	Minerai	Convers, site 40	14,75	0,05	5,03	77,18	0,88	0,56	0,23	0,04	0,42	0,68
SC327	Minerai	Convers, site 36	28,60	0,11	7,90	61,45	0,02	0,26	0,11	0,05	0,32	0,79
SC328	Minerai	Convers, site 36	1,84	0,01	2,24	95,23	0,02	0,05	0,10	0,04	0,04	0,24
SC402	Minerai	Convers, site 41	10,06	0,04	2,34	85,76	0,62	0,28	0,23	0,05	0,24	0,17
SC420	Minerai	Crassier n° 1	9,40	0,06	9,56	75,53	0,03	0,27	0,53	0,05	0,27	3,71
SC501	Minerai	Crassier n° 1	15,88	0,14	14,62	66,67	0,62	0,24	0,25	0,05	0,27	1,03
SC504	Minerai	Crassier n° 1	19,07	0,13	4,08	74,72	0,06	0,15	0,19	0,03	0,19	1,22
SC505	Minerai	Crassier n° 1	4,99	0,16	2,33	91,17	0,01	0,26	0,15	0,02	0,20	0,55
SC508	Minerai	Crassier n° 1	19,12	0,44	5,79	69,20	0,41	0,52	1,11	0,09	0,88	2,21
SC500	Minerai	Crassier n° 1	7,50	0,07	5,59	83,83	0,05	0,24	0,14	0,02	0,17	2,14
SC423	Minerai part. réd.	Crassier n° 1	17,17	0,05	2,18	78,64	0,99	0,26	0,19	0,04	0,11	0,22
SC502	Minerai part. réd.	Crassier n° 1	20,08	0,20	5,56	71,91	0,25	0,27	0,13	0,03	0,30	1,05
SC506	Minerai part. réd.	Crassier n° 1	28,24	0,16	7,45	60,29	0,13	0,35	1,82	0,07	0,53	0,64
SC427	Grès ferrugineux	Crassier n° 1	78,91	0,24	7,16	12,37	0,09	0,10	0,11	0,04	0,22	0,67
SC503	Grès ferrugineux	Crassier n° 1	67,36	0,17	9,67	15,04	0,03	3,40	2,21	0,02	0,02	1,88
SC408	Paroi	Crassier n° 1	75,59	0,26	7,28	13,85	0,06	0,24	1,29	0,06	0,85	0,34
SC411	Paroi	Crassier n° 1	75,89	0,22	6,38	15,09	0,08	0,23	0,78	0,03	0,63	0,51
SC414	Paroi	Crassier n° 1	77,24	0,23	7,68	12,08	0,04	0,21	1,03	0,06	0,65	0,56
SC418	Paroi	Crassier n° 1	85,25	0,25	12,44	1,05	0,01	0,11	0,13	0,02	0,28	0,30
SC439	SGD	Crassier n° 1	34,63	0,15	8,44	49,75	0,29	0,71	3,52	0,09	1,31	0,86
SC447	SGD	Crassier n° 1	32,02	0,15	12,74	49,71	0,28	0,48	2,56	0,08	1,12	0,55
SC448	SGD	Crassier n° 1	34,92	0,14	11,83	45,48	0,24	0,50	3,76	0,09	1,50	1,23
SC449	SGD	Crassier n° 1	35,39	0,14	9,15	47,19	0,19	0,64	4,19	0,11	1,56	1,17
SC450	SGD	Crassier n° 1	34,88	0,17	11,66	47,00	0,32	0,61	2,87	0,08	1,35	0,78
SC453	SGD	Crassier n° 1	33,06	0,18	11,92	48,93	0,24	0,44	2,54	0,10	1,34	0,89
SC459	SGD	Crassier n° 1	29,57	0,17	8,94	56,40	0,22	0,35	1,94	0,06	1,02	0,99
SC460	SGD	Crassier n° 1	34,74	0,15	15,05	44,92	0,22	0,46	2,43	0,06	1,04	0,67
SC461	SGD	Crassier n° 1	30,18	0,14	10,29	51,53	0,17	0,63	4,60	0,07	1,20	0,93
SC462	SGD	Crassier n° 1	32,81	0,15	9,18	50,53	0,18	0,56	3,52	0,11	1,38	1,31
SC467	SGD	Crassier n° 1	32,66	0,14	12,34	50,74	0,25	0,44	1,41	0,05	0,81	0,89
SC468	SGD	Crassier n° 1	34,52	0,18	10,43	50,73	0,26	0,41	1,50	0,06	0,88	0,73
SC472	SGD	Crassier n° 1	29,15	0,13	10,19	54,79	0,18	0,47	3,13	0,05	1,04	0,65
SC473	SGD	Crassier n° 1	28,26	0,11	13,00	54,39	0,25	0,39	1,93	0,05	0,87	0,50
SC517	SGD	Crassier n° 1	33,07	0,19	10,24	48,37	0,23	0,65	4,27	0,07	1,29	1,27
SC518	SGD	Crassier n° 1	29,69	0,18	8,16	55,93	0,28	0,52	3,01	0,09	0,92	0,91
SC519	SGD	Crassier n° 1	31,52	0,18	8,42	53,50	0,27	0,53	3,15	0,08	0,99	1,03
SC520	SGD	Crassier n° 1	34,63	0,19	12,04	48,99	0,20	0,33	1,59	0,06	0,72	0,89
SC521	SGD	Crassier n° 1	30,50	0,19	11,75	52,20	0,26	0,41	2,23	0,08	1,01	1,03
SC442	SVN	Crassier n° 1	38,91	0,16	13,59	40,80	0,25	0,77	3,13	0,10	1,29	0,73
SC443	SVN	Crassier n° 1	37,31	0,18	15,70	40,36	0,22	0,69	3,34	0,08	1,32	0,50
SC444	SVN	Crassier n° 1	39,21	0,17	11,73	43,06	0,27	0,54	2,90	0,06	0,95	0,80
SC445	SVN	Crassier n° 1	32,14	0,16	11,74	51,26	0,34	0,37	1,96	0,06	0,92	0,77
SC454	SVN	Crassier n° 1	35,74	0,15	11,92	44,90	0,24	0,63	3,80	0,08	1,37	0,93
SC455	SVN	Crassier n° 1	34,60	0,15	12,11	47,89	0,18	0,48	2,70	0,04	0,93	0,66
SC456	SVN	Crassier n° 1	35,14	0,16	12,62	46,14	0,26	0,51	2,96	0,06	1,11	0,73
SC457	SVN	Crassier n° 1	38,94	0,17	12,48	40,92	0,19	0,76	4,04	0,06	1,61	0,57
SC464	SVN	Crassier n° 1	37,78	0,17	11,69	46,08	0,33	0,43	1,74	0,06	0,84	0,59
SC465	SVN	Crassier n° 1	38,24	0,21	13,26	43,71	0,24	0,58	1,75	0,09	1,01	0,65
SC466	SVN	Crassier n° 1	36,00	0,19	19,12	38,15	0,18	0,85	3,12	0,07	1,61	0,48
SC470	SVN	Crassier n° 1	38,40	0,19	14,63	41,10	0,31	0,72	2,42	0,07	1,42	0,49
SC471	SVN	Crassier n° 1	37,07	0,15	13,04	44,25	0,31	0,60	1,78	0,06	1,44	0,92
SC412	SVN	Crassier n° 1	35,31	0,19	10,96	44,79	0,20	0,72	5,56	0,10	1,05	0,85
SC507	SVN	Crassier n° 1	34,68	0,22	11,43	46,55	0,24	0,59	4,38	0,07	1,01	0,52
SC509	SVN	Crassier n° 1	36,72	0,19	11,93	46,59	0,20	0,53	1,78	0,04	0,93	0,72
SC511	SVN	Crassier n° 1	41,19	0,23	10,81	39,34	0,25	0,88	5,06	0,09	1,35	0,52
SC512	SVN	Crassier n° 1	34,80	0,24	12,80	45,89	0,48	0,80	3,06	0,06	1,13	0,48
SC513	SVN	Crassier n° 1	35,01	0,20	13,15	44,22	0,41	0,77	4,09	0,07	1,15	0,64
SC514	SVN	Crassier n° 1	39,10	0,20	9,93	44,89	0,29	0,60	2,87	0,08	1,04	0,74
SC515	SVN	Crassier n° 1	35,46	0,21	10,19	44,41	0,29	1,04	5,67	0,08	1,40	0,88
SC516	SVN	Crassier n° 1	32,88	0,17	15,57	45,04	0,29	0,74	2,98	0,05	1,11	0,85
SC522	SVN	Crassier n° 1	33,39	0,21	12,31	49,34	0,28	0,65	2,07	0,06	0,98	0,44



Table 1. Liste des analyses chimiques, éléments majeurs. Résultats des analyses chimiques des échantillons étudiés en XRF. Majeurs exprimés en % poids, normés à 100% en base anhydre.

tite. Trois individus récoltés *in situ* (crassier n° 1) contiennent de la magnétite; il s'agit de fragments qui ont été incomplètement réduits lors de leur passage dans le bas fourneau, avec réduction de l'hématite en magnétite. La teneur en fer est généralement très importante et oscille entre 61 et 95% (FeO_{tot}) pour une teneur moyenne de 81,1%. Les teneurs en alumine et en silice varient fortement (rapport Si:Al entre 0,4 et 10), en fonction de la part de gangue argileuse ou de sable. La teneur en calcium est toujours faible (moins de 0,5% CaO). La teneur en phosphore est très variable et dépasse parfois légèrement 1% (P_2O_5), mais un exemplaire récolté *in situ* atteint 3,7%, montrant que du minerai riche en phosphore a pu être utilisé sporadiquement. Les autres éléments, mineurs ou traces, montrent que les gisements des *Convers* et de *La Béroudaz* sont chimiquement assez hétérogènes; on retrouve la même variabilité dans la composition des échantillons récoltés dans le crassier n° 1. Bien qu'il soit possible que du minerai plus pauvre ait également été utilisé, ces analyses montrent que les métallurgistes disposaient, sur place, d'un minerai d'excellente qualité.

Plus de la moitié des échantillons n'est pas compatible avec la composition des scories, soit parce que le rapport Si:Al est trop faible, soit parce qu'il est trop important. Cependant, un mélange comprenant toute la gamme des minerais analysés permettrait d'aboutir à des compositions tout à fait similaires à celles observées, sans devoir recourir à des ajouts. Cela suggère que la paroi n'a presque pas participé à la réaction, et qu'il n'est pas nécessaire d'envisager des ajouts siliceux. On peut cependant noter que parmi le matériel récolté dans le crassier, on a identifié deux grès ferrifères avec une très faible teneur en fer (moins de 16% de FeO_{tot}). Du grès a pu être ajouté intentionnellement, car avec un rapport Si:Al légèrement plus élevé, on augmente un peu le rendement; ces échantillons seuls ne permettent pas pour autant d'attester cette pratique.

La paroi

Les échantillons de paroi étudiés comportent trois fragments de paroi interne, partiellement scorifiés sur la partie exposée au feu. Un quatrième échantillon a été prélevé sur la base du bas fourneau à 30 cm du sol (SC418). Les spectres de diffraction font essentiellement apparaître le quartz (SiO_2) et on discerne la présence de tridymite et de cristal-

lite, deux polymorphes de haute température de la silice. La fayalite (Fe_2SiO_4) peut également être présente, et provient d'une contamination souvent assez importante par la charge du bas fourneau, soulignée par des teneurs en fer pouvant atteindre 15%. Les teneurs de silice sont élevées (moy. 78,5% SiO_2), tandis que celles de l'alumine sont relativement basses (moy. 8,4% Al_2O_3). Cela montre qu'on a ajouté une importante quantité de sable siliceux à l'argile de la paroi afin de la rendre plus réfractaire (résistante à la température).

Les scories

La plupart des scories peut être attribuée, par leur aspect macroscopique, aux deux grandes familles de scories identifiées sur le Salève: les scories grises denses (SGD) et les scories vitreuses noires (SVN), dans des proportions variables. Les SGD prédominent largement l'assemblage, avec un rapport (en poids) SGD:SVN de 5:1, voir plus selon les niveaux. Certains échantillons de grande taille présentent des caractéristiques des deux faciès à la fois, indiquant que les deux types de scories se forment dans le même appareil.

Les SGD sont très fragmentées. On distingue généralement bien une face inférieure, souvent avec des empreintes de sable ou de cailloux, et une face supérieure avec des morphologies de cordons coulés fins à épais. En coupe, les SGD montrent une texture plus ou moins dense à porosité très variable allant de 10% à plus de 50%, formant souvent de grosses bulles (Fig. 12a). Elles comportent toujours une proportion importante de fayalite, un minéral caractéristique des scories métallurgiques anciennes (Fig. 11b). La fayalite se retrouve sous différents habitus, en fonction des conditions de refroidissement: un refroidissement rapide conduit à la formation de cristaux aciculaires, tandis qu'un refroidissement lent conduit à des formes trapues et parfois jointives. Le quartz (SiO_2) est également toujours présent en petite quantité dans les SGD. Il s'y introduit sous la forme de grains millimétriques (sable) et/ou centimétriques (cailloux) non fondus et/ou partiellement fondus. Dans un cas, il est associé à la cristobalite. Dans les scories plus riches en aluminium, on observe la hercynite (FeAl_2O_4), un spinelle indiquant un apport d'aluminium provenant du minerai ou de la paroi du four. L'anorthite ($\text{CaAlSi}_3\text{O}_8$) a été identifiée dans 5 échantillons, toutes des SGD; dans les scories métallurgiques, cette phase est assez fréquente et généralement présente sous la forme de matrice vitreuse (Morton et Wingrove 1972). Parmi les phases minérales identifiées très rarement, on peut mentionner la leucite (KAlSi_3O_6), ainsi que la rhönite ($\text{Ca}_2(\text{Mg},\text{Fe}^{2+},\text{Fe}^{3+},\text{Mn})\text{Si}_3\text{O}_8$).

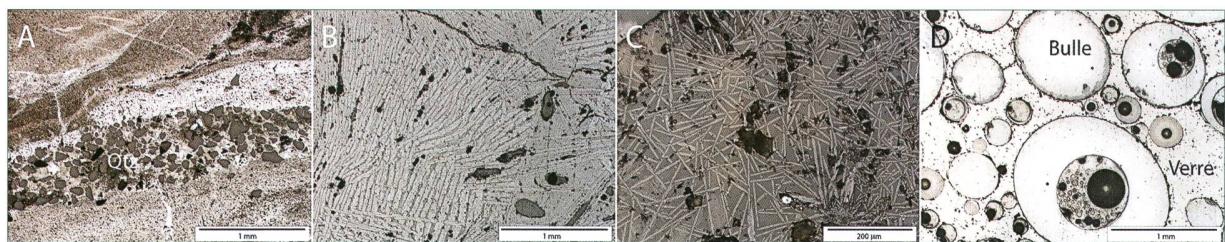


Fig. 11. Micrographes, microscope optique en lumière réfléchie. A: Minerai (éch. SC420). Structure en bandes brun-orangé, avec fin litage de quartz. B: Scorie grise dense (SGD, éch. SC450). Cordon coulé. Cristaux de fayalite tabulaires témoignant d'un refroidissement rapide. C et D: Scorie vitreuses (SVN, éch. SC470). En surface de la scorie (C), très fins cristaux aciculaires de fayalite dans une matrice vitreuse; au centre du cordon, un verre sans cristallisation, avec une importante porosité (D).

$Ti_6(Si,Al)_6O_{20}$), un silicate rare mais que l'on trouve parfois dans les scories anciennes; ces deux phases cristallisent dans des systèmes pauvres en silice et en fer, conditions qu'on retrouve particulièrement dans le liquide résiduel après un refroidissement lent, lorsqu'une partie du fer et de la silice a été soustraite par la formation de la fayalite (Kronz 1998; Serneels 1993). Les teneurs en silice sont plutôt élevées (SiO_2 moyen 32,4 %), et inversement corrélées aux teneurs en fer (FeO_{tot} moyen 50,6 %). L'alumine (Al_2O_3) varie assez fortement, avec des teneurs entre 8 et 13 %, reflétant la composition hétérogène du minéral. En raison des faibles teneurs en fer, ces scories sont assez éloignées du pôle FeO , et la Wüstite (Fe_xO) est absente; elles se distinguent ainsi des scories SGD riches en fer caractéristiques des sites plus anciens.

Les SVN se présentent sous forme de cordons ou de plaques plutôt épaisses. En surface, on observe des traces de cordons et des rides de plissement, tandis que la surface inférieure, souvent d'aspect vitrifié, porte les traces du sol sur lequel elle a refroidi, avec des empreintes de charbon et de petits cailloux. En coupe, on observe souvent une matrice noire, brillante et très vacuolaire. La porosité est toujours supérieure à 50 %, avec des pores de taille variable, mais presque toujours inférieures à 5 mm, et toujours arrondies (Fig. 12b). Les analyses et l'observation des lames minces au microscope montrent que les SVN comportent majoritairement à la fois de la fayalite et du quartz, présents en quantité relativement importante et associés, dans deux cas, à de la cristobalite. La fayalite se forme dans un verre peu riche en fer et a un habitus aciculaire (Fig. 11c). Plus

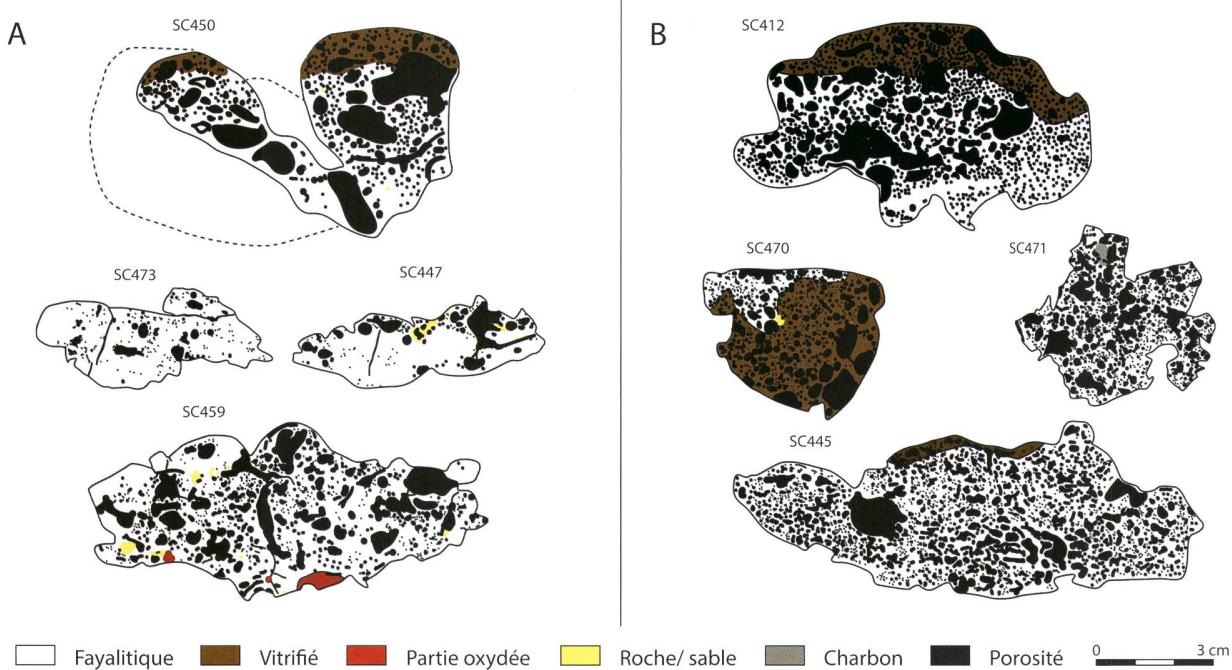


Fig. 12. Coupes représentatives de scories. A: scories denses (SGD). B: scories vitreuses (SVN).

de la moitié des pièces comprennent de l'hercynite, en rapport avec la teneur en alumine. D'une manière générale, la fraction cristallisée est nettement moins importante que parmi les SGD, l'essentiel de la matrice étant formée par une phase amorphe (verre, Fig. 11d). La teneur en fer est plutôt faible (moy. 44,3 % FeO_{tot}) et celle en silice élevée (moy. 36,4 % SiO_2). Comme pour les SGD, la variabilité des teneurs en alumine du minerai se répercute sur celle des scories (entre 10 et 19 % Al_2O_3). Les scories de type SVN se distinguent ainsi nettement des SGD par une teneur en fer inférieure de 6 %, et inversement par une teneur en silice plus importante de 4 %. Les SVN sont également significativement plus pauvres en phosphore (P_2O_5 de 0,67 %, vs 0,91 % pour les SGD). Le partitionnement du phosphore, qui peut provenir des cendres et du minerai, dépend des conditions thermodynamiques dans le bas fourneau; en fonction de la température et de la fugacité d'oxygène, il sera plus ou moins réduit et se concentrera préférentiellement dans le fer ou les scories (Kronz 1998). Les analyses des SVN montrent qu'elles se forment dans une atmosphère plus réductrice, reflétant des conditions locales plus favorables ou une évolution des conditions redox au cours de l'opération. La teneur en calcium (inférieure à 6 %) permet d'exclure l'utilisation d'un flux calcaire; elle est comparable à celle des SGD, et pour les deux types de scories, elle est fortement corré-

lée à celle en magnésium (0,4 à 1 % MgO), indiquant qu'elle est due à l'apport du combustible. En raison d'une teneur plus importante en silice, qui est un oxyde acide qui agit comme formateur de réseau, les SVN sont moins fluides que les SGD. Cette viscosité pourrait également expliquer la nature fortement vacuolaire de ces scories, puisqu'elle peut empêcher l'évacuation des gaz qui restent alors piégés et forment des bulles. D'autre part, le caractère vitreux et la plus faible cristallisation des SVN suggèrent un refroidissement très rapide.

La projection des compositions des scories du crassier n° 1 sur le diagramme ternaire $\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ montre qu'elles forment un groupe assez compact centré sur l'eutectique ternaire (optimum thermique avec le point de fusion le plus faible; Fig. 13). Cela indique une technologie bien maîtrisée et à basse température, située grossièrement entre 1100 et 1200 °C, même si certaines scories plus riches en alumine ont un point de fusion plus élevé. Les deux types de scories se forment à des températures relativement proches. Les scories SVN ne témoignent donc pas d'un procédé à plus haute température. Toutefois, puisque la quantité de fer contenue dans les scories vitreuses est plus faible, la production de déchets vitreux permet en principe un meilleur rendement. Sur le site étudié, la proportion de scories SVN est très faible (de l'ordre de 15 %), et n'a pas d'impact décisif sur la quantité de fer extraite. Mais si cette proportion devenait plus importante, le rendement s'en ferait assez rapidement ressentir. Du point de vue de l'efficacité de l'opération, il est donc tout à fait judicieux de tenter d'influencer la marche du système de telle sorte que la part des scories grises denses diminue au détriment des scories vitreuses.

Une analyse détaillée des compositions chimiques des scories provenant de différents niveaux du crassier, allant de la base de la séquence aux niveaux les plus récents (anciens: E24/27, intermédiaires: E5, récents: E3/4), fait état d'une grande homogénéité sur toute la durée d'occupation. La seule distinction concerne des teneurs en manganèse et (à moindre titre) en titane très légèrement plus importantes des scories issues du niveau le plus ancien, tant pour les SVN que SGD. Ces différences, minimes mais permettant de discriminer les scories du niveau basal,

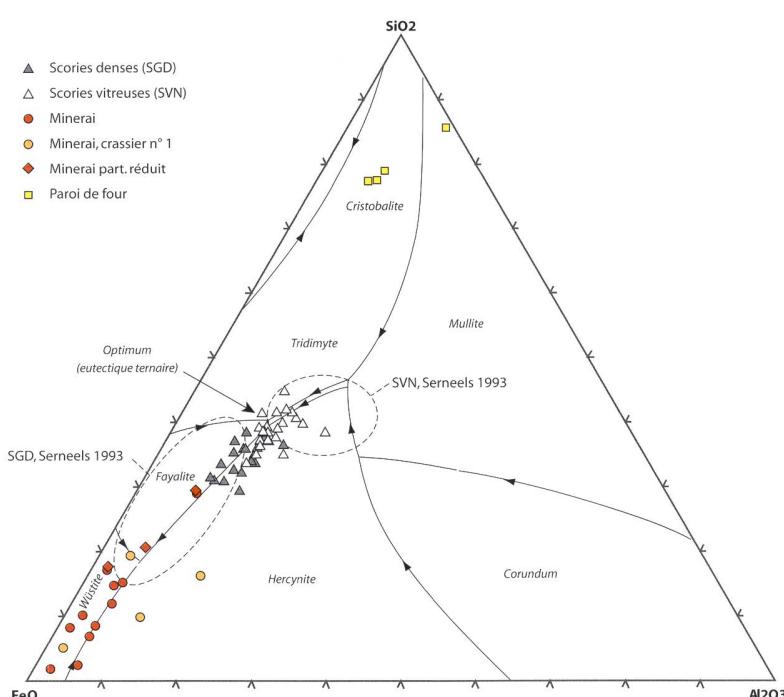


Fig. 13. Projection des compositions chimiques sur un diagramme ternaire. À noter, le groupe compact formé par les scories, tant denses (SGD) que vitreuses (SVN), autour de l'optimum thermique situé à l'intersection des domaines fayalite, hercynite et tridimite. Les domaines de projection des autres analyses de scories du Salève (Serneels 1993) sont reportés en pointillé.

Table 2. Teneurs moyennes pour les différents types de matériaux, en % poids. Exprimés en oxydes et en éléments (trois dernières colonnes, pour Si, Al et Fe seulement).

Type de matériau	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _{tot}	Teneur en oxydes (%)						Teneur, en éléments (%)		
					MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Si	Al	Fe
Minerai total (hors part. réduit)	11,76	0,10	5,17	80,68	0,27	0,24	0,23	0,05	0,26	0,98	5,11	2,54	57,95
Minerai crassier n° 1 (hors part. réduit)	12,66	0,17	7,00	76,85	0,20	0,28	0,39	0,04	0,33	1,81	5,58	3,49	56,28
Paroi de four	78,49	0,24	8,44	10,52	0,05	0,20	0,81	0,04	0,60	0,43	36,48	4,44	8,11
Scories denses (SGD)	32,43	0,16	10,83	50,58	0,24	0,50	2,85	0,08	1,12	0,91	15,05	5,69	39,01
Scories vitreuses (SVN)	36,44	0,19	12,73	44,33	0,27	0,66	3,18	0,07	1,17	0,67	16,82	6,65	34,02

s'expliquent vraisemblablement par un minerai plus riche en manganèse, et indiquent que les sources de matière première ont pu évoluer.

On voit, sur le diagramme ternaire, que les compositions chimiques de l'ensemble des autres scories du massif (analyses de V. Serneels, 1993, en pointillé) décrivent un champ nettement plus large que celui des scories présentées ici, sans le recouvrir totalement, reflétant des conditions locales différencierées (minerai, savoir-faire). Cela est cependant également lié à la teneur en fer plus importante des SGD plus anciennes, plus proches du pôle FeO. En dépit d'un aspect macroscopique similaire, les SGD anciennes et récentes n'ont pas exactement les mêmes caractéristiques chimiques et minéralogiques, et il ne fait aucun doute que du point de vue du rendement, les scories plus jeunes représentent le résultat d'un processus technique amélioré.

Evaluation de la production

Pour évaluer la production d'un site métallurgique, on calcule, à l'aide d'un bilan de masse, la quantité de fer qui a pu être extraite par unité de minerai, ainsi la quantité de scories produite lors de cette extraction. Il faut également estimer la quantité totale de scories présentes sur le site, en se basant sur des cubages et des calculs volumétriques. On peut, sur cette base, extrapoler le résultat du bilan masse au niveau du site (Leroy et al. 2015).

Bilan des masses

Les calculs du bilan de masse sont basés sur le principe de la conservation des masses et la modélisation des flux des matériaux qui entrent et qui sortent

d'un système. Pour des procédés de réduction anciens, plusieurs méthodes de calcul ont été mises en œuvre par différents auteurs. Pour cette étude, nous avons appliqué une méthode relativement simple qui aboutit à de bonnes approximations (Leroy et al. 2015; Serneels 1993), basée sur les trois éléments chimiques Fe, Si et Al. Les calculs tiennent compte des flux de minerai et de paroi (qui entrent dans le bas fourneau), ainsi que des scories denses (SGD, majoritaires) et du fer (qui en ressortent); en regard de l'apport très restreint des cendres à ce système, le combustible est négligé ici.

Si on résout le système d'équation comprenant ces flux, on obtient le résultat suivant:

$$1,37 \text{ [u] minerai} + 0,20 \text{ [u] paroi} \\ = 1,00 \text{ [u] scories SGD} + 0,40 \text{ [u] fer},$$

où [u] représente une unité en poids (g ou kg). Cela est aisément vérifié par les trois équations suivantes, où l'on a reporté les compositions chimiques élémentaires moyennes des quatre flux (Tab. 2):

$$1,37 \cdot 5,58\% + 0,20 \cdot 36,48\% \\ = 1,00 \cdot 15,05\% \text{ (teneurs en Si)} \\ 1,37 \cdot 3,49\% + 0,20 \cdot 4,44\% \\ = 1,00 \cdot 5,69\% \text{ (teneurs en Al)} \\ 1,37 \cdot 56,28\% + 0,20 \cdot 8,11\% \\ = 1,00 \cdot 39,01\% + 0,40 \cdot 100\% \text{ (teneurs en Fe)}$$

Ainsi, pour 13,7 kg de minerai anhydre⁵ mis dans le bas fourneau, on a donc théoriquement pu extraire 4,0 kg de fer, tout en produisant 10,0 kg de scories; une faible quantité de paroi du four fond pendant la réduction (2,0 kg), et entre dans la composition de la scorie⁶. Le fer extrait n'est bien entendu pas exploitable tel quel. Il s'agit d'une éponge spongieuse et hétérogène contenant une grande quantité d'impuretés (scorie), qui doit être épurée et compactée dans un bas foyer; au cours de cette opération, une part substantielle du fer est perdue (Crew 2013).

Pour obtenir le rendement, on divise la quantité de fer extraite par la quantité de fer contenue dans le minerai. De cette manière, on calcule un rendement de 51% (290 g de fer extrait par kg de minerai). C'est un bon taux d'extraction, même si l'on ne tient

⁵ Comme le minerai utilisé contient en moyenne 12 % d'eau, un poids de 13,7 kg de minerai anhydre correspond à 15,3 kg de minerai brut.

⁶ La différence entre les poids des flux entrants et sortants (1,7 kg) s'explique par la réduction d'une partie de l'oxygène, qui s'échappe sous forme de gaz (monoxyde et dioxyde de carbone).

pas compte des SVN. Ce rendement s'explique par la haute teneur en fer du mineraï, conjugué à des scories relativement pauvres en fer.

Il faut cependant être conscient des limites de la méthode, et considérer le bilan de masse proposé ici avec prudence. En effet, si la composition moyenne des scories peut être déterminée relativement précisément, ce n'est pas le cas du mineraï, dont les teneurs en fer, mais aussi en silice ou en alumine varient fortement. Pour nos calculs, nous avons utilisé les teneurs moyennes du mineraï récolté *in situ* dans le crassier (6 individus), car ce mineraï a délibérément été sélectionné et amené sur place dans le but d'être utilisé. Si on fait le même calcul en tenant compte de *l'ensemble* des échantillons analysés (17 individus)⁷, incluant les ramassages sur les haldes et minières des *Convers*, le rendement s'élève à 67% (390 g de fer extrait par kg de mineraï); c'est une augmentation de l'ordre de 35%. D'autres échantillonnages pourraient aboutir à d'autres résultats encore. En raison de la disponibilité d'un mineraï de bonne qualité, à proximité immédiate du site, il semble cependant peu probable que les métallurgistes aient obtenu un rendement significativement en dessous de 50%. Vers le haut, le rendement est limité par l'effort supplémentaire, en termes de travail, que demande un tri trop sélectif du mineraï. Nous pensons donc qu'en dépit des incertitudes sur les teneurs réelles, le résultat du bilan des masses représente une bonne approximation, qui peut être utilisée pour des calculs de production.

Vers une opération de réduction type

On peut mettre les chiffres obtenus en relation avec les vestiges archéologiques du bas fourneau BF1. Le diamètre interne de cette structure est d'environ 30 cm. Pour une cheminée haute de 2 m, le volume interne de la chambre de combustion devait avoisiner 0,15 m³. Le poids du charbon de bois est d'un peu plus de 200 kg par m³ (Rehder 2000), soit 30 kg pour 0,15 m³.

Au regard du faible diamètre interne du bas fourneau BF1, la quantité de fer extrait à chaque opération de réduction ne devait guère dépasser 4 kg

⁷ Nous avons exclu les trois fragments de mineraï partiellement réduits qui ont déjà subi une première réduction.

⁸ Les proportions entre charbon de bois et mineraï de 2:1 (en termes de poids) retenus ici s'accordent bien avec les données expérimentales, tout du moins en tirage forcé (avec soufflets). En ce qui concerne la taille des éponges, à titre de comparaison, les éponges de fer les plus grosses obtenues par Tylecote et al. (1971) atteignaient un poids de l'ordre de 6 kg; celles produites par P. Crew et al. (2013), n'excédaient généralement pas entre 2 et 3 kg.

au grand maximum (le poids de l'éponge de fer, qui comprend encore de nombreuses inclusions, étant forcément supérieur au poids du fer qu'elle contient). En tenant compte du bilan des masses, il faudrait, pour le produire, environ 15 kg de mineraï brut, aboutissant à la formation de 10 kg de scories. Cette opération nécessiterait dans l'ordre de 30 kg de charbon de bois, en admettant que le fourneau ne soit pas rechargé au cours de la réduction. Ces chiffres semblent assez raisonnables, si on les compare avec le corpus de données expérimentales (voir, par exemple, Crew 2013 et Tylecote et al. 1971 pour des données obtenues dans des bas fourneaux d'un diamètre similaire)⁸.

Une activité sidérurgique soutenue

Pour terminer, on peut tenter d'extrapoler ces chiffres à l'échelle du crassier. En simplifiant la configuration topographique du site, on peut considérer qu'il est constitué de deux demi ellipsoïdes longs de 20 m et larges de 5 m. L'épaisseur de l'amas ouest est estimée à environ 175 cm, celle de l'amas est à 150 cm. Le volume d'un demi d'ellipsoïde se calcule par :

$$V = (4/3) \cdot \pi \cdot r1 \cdot r2 \cdot r3/2,$$

où $r1$ représente la longueur, $r2$ la largeur, et $r3/2$ l'épaisseur. On obtient ainsi un volume cumulé de 340 m³. Cinq cubages effectués dans différents niveaux du crassier, portant sur un volume total de 150 litres, ont permis de déterminer la quantité de scories (SGD et SVN) par volume. Ce chiffre est évalué à 645 kg/m³. Si on le reporte au niveau du crassier, on aboutit à une estimation de 220 tonnes de scories. A raison de 10 kg de scories par opération de réduction, le crassier n° 1 représenterait ainsi 22 000 opérations.

Il est difficile d'évaluer la durée d'occupation du site. Les datations C14 disponibles suggèrent que l'activité de production pourrait s'étaler sur près de 5 siècles, sans doute avec de nombreuses interruptions. En partant de l'hypothèse irréaliste d'une occupation (saisonnière) continue sur toute cette période, on aboutit à 44 opérations de réduction par saison. Ce chiffre est certainement sous-évalué. Sans même préssager de la durée d'une opération, on peut conclure à une activité soutenue, qui devait couvrir une bonne partie de la saison propice.

I Gestion des ressources boisées

La forêt joue un rôle primordial dans le contexte des activités métallurgiques. L'extraction, la réduction du mineraï et le travail du métal nécessitent

des quantités considérables de bois, et ces activités ont laissé de nombreuses traces dans les paysages. Témoignant de cette utilisation massive de la ressource boisée, les charbons de bois sont très répandus dans les sites sidérurgiques anciens. Dans ce contexte, une approche anthracologique s'avère essentielle pour appréhender dans sa globalité l'organisation socioéconomique de la production du fer, mais aussi pour déterminer son impact sur l'environnement.

Depuis longtemps, des recherches proposent de restituer l'environnement des ateliers de réduction et cherchent à mesurer l'impact des activités métallurgiques sur le couvert forestier. On peut mentionner les travaux pionniers réalisés dans les années 1970 sur les sites vaudois (Pelet 1993), ou encore ceux dans le Jura suisse (Eschenlohr et Serneels 1991) ou en Bourgogne (Dunikowski et Cabboi 1995). Ces recherches mettent en lumière la difficulté de quantifier les volumes de bois consommés par ces activités uniquement à partir de volumes de scories retrouvés dans les ferriers. Les ratios proposés, principalement à partir d'approches expérimentales, vont du simple au triple. Depuis quelques années, les recherches privilégient les approches pluridisciplinaires, croisant les données issues de l'archéométrie avec les analyses archéobotaniques tout en s'appuyant sur un corpus de plus en plus important d'expérimentations (Vivet et al. 2009). Les récents développements méthodologiques en anthracologie apportent de nouvelles perspectives de recherche pour l'étude des « forêts métallurgiques ». La mise en place de meilleurs outils de mesure pour estimer le diamètre des bois exploités (Dufraisse 2006; Marguerie et Hunot 2007) et un intérêt croissant portant sur la représentativité paléoécologique des assemblages anthracologiques obtenus sur des sites métallurgiques et des charbonnières (Paradis-Grenouillet et al. 2015; Py 2006) permet d'approcher la gestion sylvicole avec un nouveau regard.

Etude dendro-anthracologique des charbons de bois

Les charbons de bois du crassier n° 1 ont fait l'objet de prélèvements systématiques couvrant l'ensemble de la séquence stratigraphique, selon un protocole devant garantir une bonne représentativité. Les charbons ont été extraits par flottaison et tri manuel après tamisage à la maille 8 (2,8 mm) et 18 (1,25 mm). Les fractions grossières et fines ont été intégralement récupérées; les ensembles les plus im-

Table 3. Liste des prélèvements de charbons de bois étudiés, avec le nombre de fragments de charbons observés.

Ensemble stratigr.	Décapage	Sous-échant.	Nb charbons étudiés
E2/8/9	P22d2	oui	96
E2/8/9	Q20d2 ^(a)	oui	115
E25	M22d6	oui	99
E25	M22d7NE	oui	97
E25	M22d7SE	oui	60
E6/7/21	L20d6	oui	99
E6/7/21	L20d7	oui	108
E6/7/21	M20d7	oui	96
E6/7/21	N20d8 ^(b)	non	26
E19/23/24	L20d8	oui	108
E19/23/24	M20d8	oui	103

Notes de bas de table :

a) Prélèvement hors protocole

b) Les proportions ont été calculés sur moins de 30 charbons

portants ont été sous-échantillonnés par l'anthracologue. En tout, 10 prélèvements ont été étudiés pour ce site, portant sur 892 charbons ; ils sont complétés par un autre prélèvement, non représentatif quantitativement, car récolté hors protocole, comprenant 115 charbons. Pour des raisons de pertinence statistique, les prélèvements ont été regroupés dans des lots stratigraphiquement cohérents comportant au moins une centaine d'individus (Tab. 3).

Parmi les taxons identifiés lors de l'analyse (Fig. 14), on notera une large dominance de hêtre (*Fagus sylvatica*) avec 701 fragments, suivi par le sapin pectiné (*Abies alba*) (113) et l'if (*Taxus baccata*) (80). Les autres taxons sont nettement moins représentés : 21 fragments d'érable, provenant probablement d'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*), bien qu'on ne puisse écarter l'utilisation potentiel d'érable champêtre (*Acer campestre*), et/ou d'érable à feuilles d'obier (*Acer opalus*) et/ou d'érable plane (*Acer platanoides*), 3 fragments présentant des critères proches de ceux du genre *Prunus* provenant probablement de merisier (*Prunus avium*), 1 fragment de genévrier (*Juniperus*), 1 fragment de saule pouvant provenir d'une grande variété de saules (vraisemblablement *Salix caprea*), et 1 fragment de la famille des rosacés maloïdés (*Rosaceae maloïdeae*) qui pourrait également provenir de différentes espèces. D'une manière générale on peut supposer que le petit-bois de proximité, soit présent dans les clairières, soit dans les zones de coupes ou encore des massifs isolés dans l'alpage, servait pour allumer le feu.

Évocation des milieux arborés et leur évolution

Au regard des listes des espèces qui auraient pu être employées comme combustible sur le site métallurgique, il est possible d'évoquer les environnements

arborés dans lesquels les bois ont été prélevés. En effet, les conditions autécologiques de chaque espèce nous renseignent sur la densité arborée du milieu et les conditions hygrométriques. Les trois espèces dominantes, le hêtre, le sapin et l'if, peuvent se développer sur des mêmes stations : sols bien drainés à frais dans des espaces forestiers relativement denses. Les hêtraies sapinières offrent des conditions optimales pour ces espèces, les sapins protégeant les jeunes pousses de hêtre de la lumière dans leurs premières années de vie. Au-delà de la présence possible de hêtraie sapinière sur les versants du Salève (faciès sylvicole que l'on retrouve actuellement), l'identification des taxons secondaires apporte quelques informations complémentaires sur les aires d'approvisionnement en combustible. La présence d'érable, de genévrier ou encore de saule indique un approvisionnement en bois dans des milieux plus ouverts. De plus, au-delà du caractère d'ouverture du milieu, ces espèces révèlent des origines stationnelles différentes. Si le genévrier privilégie les sols secs à bien drainés, en revanche, les saules préfèrent les sols frais à humides. Il est donc possible d'envisager

⁹ On notera des résultats légèrement différents pour les deux prélèvements appartenant aux niveaux les plus anciens (E7/23 et E19/24). Le premier présente de très faibles proportions de sapin, comme pour les phases les plus récentes, tandis que le second révèle une proportion de sapin dépassant 50 % de l'assemblage. Il est pour l'instant délicat d'expliquer ces résultats, compte tenu du nombre très importants de charbons indéterminés dans le prélèvement issu de E19/24. Le niveau de charbon basal E7/23 quant à lui est interprété, à titre d'hypothèse, comme résultant du charbonnage *in situ* (voir ci-dessus).

un approvisionnement sur des stations différentes. Des plateformes de charbonnage réparties sur l'ensemble du versant au cœur de la hêtraie sapinière ou à proximité d'un cours d'eau par exemple pourraient expliquer cette diversité.

Au regard de la stratigraphie, les données anthracologiques suggèrent des changements dans les proportions des deux taxons dominants que sont le hêtre et le sapin (Fig. 14). Dans les niveaux inférieurs, correspondant aux phases de production les plus anciennes (ensembles E6, E7, E19-24), le hêtre est certes majoritaire mais les proportions de sapin sont relativement importantes (entre 13 et 22%). Ces proportions de sapin chutent très fortement dans les niveaux plus récents, notamment dans les ensembles E6 et E8 (moins de 7%)⁹. La baisse du sapin correspond-elle à un choix volontaire de la part des charbonniers et des métallurgistes de prioriser le hêtre, ou cette baisse résulte-t-elle d'une diminution du sapin dans les couverts forestiers ? Le sapin est peu propice à une exploitation intensive. Contrairement au hêtre, le sapin ne rejette pas de souche. L'approvisionnement en combustible aurait pu transformer le milieu, évinçant progressivement le sapin à la faveur du hêtre. Celui-ci, bien adapté à la pratique de gestion en taillis, notamment en milieu montagnard, se serait alors imposé comme sylvofaciès dominant sur les versants du Salève. Enfin, nous ne pouvons pas écarter la possibilité d'un biais taphonomique ou statistique ; les prélèvements issus des niveaux les plus récents sont actuellement sous-représentés, et il faudrait, pour confirmer les résultats, analyser des lots supplémentaires.

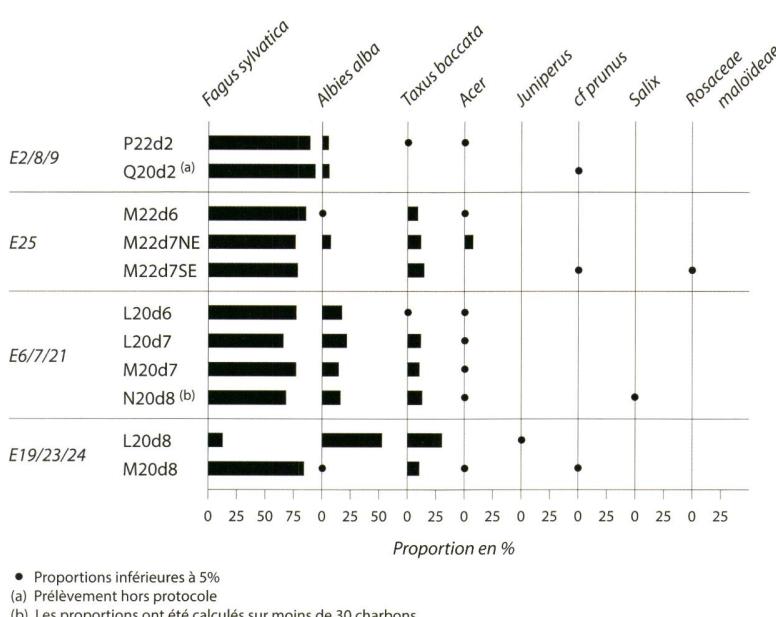


Fig. 14. Anthracogramme représentant l'ensemble des résultats de la détermination taxonomique.

Restitution du diamètre des bois

L'analyse dendro-anthracologique a pour but de restituer une image des diamètres des bûches employées pour la fabrication du charbon de bois ; elle permet ainsi de faire des inférences sur les modes de gestion des ressources boisées (pour une discussion détaillée de la méthodologie, voir Paradis-Grenouillet et al. 2013; Paradis-Grenouillet et al. 2015; Dufraisse et Garcia 2011). Nous proposons ici un premier bilan des résultats de cette étude. Le rayon de courbure a pu être déterminé sur 477 charbons du site. Les données obtenues sur le hêtre en particulier sont assez complètes, et les traitements statistiques nécessaires pour définir le diamètre des bois ont pu être appliqués aux prin-

Table 4. Résultats dendro-anthracologiques. Présentation des données dendro-anthracologiques brutes obtenues sur les charbons de hêtre et interprétation des résultats à l'aide de simulations théoriques (voir Paradis-Grenouillet et al. 2015). Pour l'interprétation du diamètre des bois, (+) : catégorie de diamètre minoritaire, (++) : catégorie de diamètre majoritaire, 0 : absence de cette catégorie de diamètre.

Ensemble stratigr.	Décapage	Nb charbons mesurés	Nb charbons mesurés après correction (+25 %)			Surfaces charbons mesurés (mm ²) après correction			Interprétation du diamètre des bois					
			[0-1]	[11-2.5]	[12.5-5]	[5-9]	[9-11]	[11-2.5]	[12.5-5]	[5-9]	<2cm	2-5cm	5-10cm	10-18cm
E8	P22d2	56	4	9	14	29	0	352	983	773	2177	0	++	0
Total E8		56	0	4	14	29	0.0 %	8.2 %	22.9 %	18.0 %	50.8 %			
E25	M22d6	46	4	15	8	19	308	770	847	2057	0	0	++	0
E25	M22d7NE	43	1	6	15	6	40	412	1091	259	0	0	++	0
E25	M22d075FE ^(a)	23	1	1	8	13	63	60	446	687	0	0	++	0
Total E25		112	2	11	30	47	1.3 %	9.7 %	23.2 %	19.4 %	46.4 %			
E6/7	L20d6	59	8	12	15	24	1219	1116	2462	3448	++	0	0	+
E6/7	L20d7	43	3	12	11	17	166	1454	804	1164	0	0	0	++
E7/21	M20d7	46	5	11	8	22	296	878	900	1669	++	0	0	+
E7/21	N20d8 ^(a)	3	1	2			38	284		0	0	0	0	+
Total E6/7/21		151	16	36	34	65	0.0 %	10.6 %	21.9 %	26.2 %	41.3 %			
E19/24	L20d8 ^(b)	6	2	13	11	19	57	685	364	1047	0	0	++	0
E23	M20d8	45	2	14	12	23	0.0 %	2.6 %	31.8 %	16.9 %	48.6 %			
Total E19/23/24/51		0												

Notes de bas de table :

a) Echantillon de faible taille b) Traitement statistique impossible

ciaux ensembles étudiés (Tab. 4). L'étude met en évidence l'exploitation systématique de bois de très gros diamètre (supérieur à 30 cm) pour l'ensemble des périodes d'activités. Ses proportions semblent cependant évoluer: dominant dans les niveaux les plus anciens, il est moins présent dans les niveaux les plus récents, où il est associé à des bois de diamètre moyen (5 à 10 cm de diamètre) et/ou petit (2 à 5 cm de diamètre). Ces résultats doivent être corroborés par des analyses futures centrées sur les dernières phases d'occupation. Ils suggèrent cependant assez nettement un changement dans le type de combustible employé, qui pourrait témoigner d'une évolution dans les stratégies d'approvisionnement en bois ou résulter d'une transformation du milieu.

Conclusions

Ces nouvelles recherches contribuent à dégager une image de plus en plus complète de la production médiévale du fer sur le Salève. Les données acquises au cours de prospections extensives fournissent une excellente base pour évaluer l'importance du secteur sidérurgique et son impact sur les ressources boisées à l'échelle du massif. Les interventions archéologiques plus ponctuelles sur les alpages des *Convers* et de *La Béroudaz* nous permettent quant à elles de mieux appréhender les aspects historiques, technologiques et économiques du système de production du fer du Salève.

Des fouilles dans et autour du crassier n° 1 de *La Béroudaz* ont permis d'établir une séquence stratigraphique assez complète à travers les dépôts de scories, qui ont livré les vestiges de plusieurs structures de combustion. Un bas fourneau particulièrement bien conservé, installé dans l'aire de travail au centre de l'anneau constitué par les rejets de scories, est caractérisé par un diamètre interne très faible, de l'ordre de 30 cm, et pourrait s'apparenter à un type de bas fourneau à tirage naturel contemporain caractéristique du Jura central suisse. Cela semble confirmer une filiation avec la sidérurgie de l'arc jurassien, qui est plus généralement suggérée par les assemblages de scories du Salève. Les trois nouvelles datations par AMS, qui s'ajoutent à une date obtenue antérieurement sur cet amas, font état d'une période d'occupation étonnamment longue, qui pourrait couvrir cinq siècles et s'étire sur l'ensemble de la seconde phase de production du Salève (IX^e au XIII^e, voire XIV^e siècle), mais elle est entrecoupée de plusieurs périodes d'abandon peut-être prolongées.

Les analyses pétrographiques en laboratoire montrent qu'un minerai de fer de bonne qualité et parfois très riche en fer était disponible sur place

et a été exploité par les métallurgistes. Des indices suggèrent que des grès ferrugineux ont parfois pu être ajoutées comme fondant, mais la pratique n'est pas fermement établie. L'assemblage des scories du crassier est essentiellement constitué de scories coulées grises et denses (SGD), mais comporte toujours une faible proportion de scories vitreuses (SVN, moins de 20 % poids), qui se distinguent par une cassure noirâtre et souvent très vacuolaire. Les premières sont dominées par une phase de cristaux de fayalite bien exprimés, tandis que les secondes contiennent une proportion importante de quartz pris dans une matrice vitreuse. Les teneurs en fer des deux types de scories sont relativement faibles (FeO_{tot} respectivement 51 % vs 44 %), ce qui permet de les distinguer des scories plus anciennes. Les SVN, plus pauvres en fer, ne sont pas le produit d'un procédé à plus haute température, mais résultent de conditions thermodynamiques plus favorables (notamment une atmosphère plus réductrice), qui aboutissent à un meilleur taux d'extraction du fer. Les deux types de scories se forment dans les mêmes bas fourneaux, mais probablement à des moments distincts de l'opération de réduction. L'ensemble des scories du crassier, provenant tant de niveaux anciens comme récents, forme un groupe très compact situé autour de l'optimum thermique (la température de fusion la plus faible). Cela suggère une technologie bien établie et maîtrisée, dès la reprise des activités au IX^e siècle, et montre que les activités sidérurgiques ont dû être mises en place par des artisans venus d'un autre district minier, qui ont importé un procédé efficace et leur expertise.

Sur la base des analyses chimiques du matériel récolté dans le crassier, le calcul du bilan des masses permet d'établir le rendement moyen d'une opération de réduction, évalué à environ 50 %; c'est un chiffre relativement important qui témoigne d'une bonne maîtrise technologique. Le volume du crassier représente vraisemblablement plus de 20 000 opérations de réductions, ce qui revient, sur une durée de cinq siècles continus, à au moins 40 opérations par année. En considérant qu'il s'agit d'une activité saisonnière, et que le site a parfois pu être abandonné, on doit conclure à une activité relativement soutenue. Si l'on étend cette réflexion au niveau de toute la zone étudiée, qui comporte une bonne dizaine de crassiers plus ou moins contemporains (dont au moins trois de taille similaire), l'on obtient une meilleure image de l'intensité de l'exploitation; même en faisant une estimation prudente, la quantité de scories doit avoisiner 1000 tonnes, pour une production de fer de 400 tonnes. En tenant compte de toutes les marges d'erreur et une production étalée sur quatre à cinq siècles, la production de fer annuelle des sites de la zone des *Convers* et de *La Béroudaz* peut ainsi être évaluée dans l'ordre d'une tonne de

fer par année. C'est une activité qui devait mobiliser, pendant la saison propice, quelques personnes à plein temps pour toutes les tâches appartenant à la chaîne opératoire (abattage et préparation du minerai, charbonnage, réduction, épuration).

Qu'en est-il des autres zones de production du fer du Salève? Nous ne sommes pas encore en mesure d'étendre ce genre de démarche à l'ensemble du massif. Nous manquons de données quantitatives, et la chronologie demeure trop incertaine, même à l'échelle de la zone réduite étudiée. Il apparaît néanmoins que l'étendue des activités sidérurgiques est suffisamment importante, peut-être dès l'époque carolingienne et en tout cas pendant le Moyen Âge classique, pour que se pose la question du contrôle et du débouché de cette production, qui semble revêtir au moins certains critères de ce qu'on peut appeler une industrie: «une production quantitative importante, régulière, de qualité constante et reconnue sur le marché, une production qui dépasse le marché local» (Verna 2017). Il est encore trop tôt pour se prononcer sur les acteurs de cette sidérurgie ou sur les circuits de distribution du fer produit sur le Salève, mais on peut proposer quelques pistes de réflexions. Genève, capitale burgonde puis ville épiscopale, était sans doute l'une des destinations du métal salévrier. Lors de la fondation du monastère de Pomier, vers 1170, la montagne du Salève appartenait en grande partie au comte de Genève. Il est vraisemblable que pour les périodes antérieures, du royaume burgonde jusqu'à l'avènement du comté de Genève au XI^e siècle (Duparc 1955), la montagne salévienne était en grande partie, comme les Monts Jura, une terre «fiscale», c'est-à-dire rattachée au domaine direct du souverain. Ici, en tous cas, pas de cession à un monastère comme dans le district sidérurgique du Jura central suisse, dont l'exploitation fut très certainement activée à l'initiative des moines de l'abbaye de Bellelay (Eschenlohr 2001). Les ressources minières, régaliennes par essence, appartenaient au souverain sauf délégation officielle. Il en autorisait puis en contrôlait l'exploitation, même si celle-ci se développait sur un terrain privé. Pour la seconde phase d'activité sidérurgique du Salève, qui recouvre l'essentiel de la production des *Convers* et de *La Béroudaz*, on peut alors envisager deux types d'organisation sociale. Soit le seigneur souverain valorisait directement sa propriété foncière (le bois, notamment) et la ressource minière dont il était propriétaire par droit régalien en faisant travailler une équipe qu'il rémunérait et dont il vendait le produit. Soit il concédait ces ressources (bois, minerai, eaux, etc.) à des tiers, qui produisaient pour leur compte contre une redevance (en général un pourcentage du produit minier ou sidérurgique). Dans tous les cas, au regard des besoins relativement importants en main-d'œuvre sur toute la saison estivale, il est

difficile d'imaginer que le fer ait été produit dans le seul cadre d'une pluriactivité paysanne, où la métallurgie n'aurait représenté qu'une activité d'appoint.

On peut par ailleurs se poser la question de l'impact de cette production sur l'environnement, notamment en termes de gestion sylvicole. L'étude anthracologique des charbons de bois prélevés dans le crassier n° 1 montre qu'on a essentiellement exploité le hêtre et, à moindre mesure, le sapin et l'if. Les trois espèces peuvent se développer sur les mêmes stations, et évoquent la hêtraie sapinière, que l'on retrouve actuellement sur le Salève. On devine cependant quelques évolutions, tant dans l'assemblage, avec une légère diminution de la part du sapin, qu'en termes du module du bois exploité, avec une diminution des diamètres des bûches utilisées. Cela pourrait témoigner d'un changement du mode d'approvisionnement délibéré, les métallurgistes pouvant par exemple choisir privilégier le hêtre plus dense ou de plus petits modules. Mais cela pourrait également indiquer une modification de l'environnement, avec une diminution du sapin dans les couverts forestiers au profit du hêtre, bien adapté à la pratique de gestion en taillis et supplantant progressivement le sapin. L'extension prévue, dans le cadre des prospections en cours, de l'approche anthracologique aux sites de charbonnages voisins et à l'échelle du massif, couplée à une multiplication des datations, permettra d'identifier avec un plus grand degré de certitude les évolutions du couvert forestier, et d'aborder le rôle qu'ont pu jouer les activités sidérurgiques dans ces évolutions.

■ Remerciements

Ces programmes de recherche ont bénéficié du soutien financier du Conseil départemental de la Haute Savoie et du Ministère de la Culture, que nous remercions pour leur engagement. Pour leur soutien continu, nous remercions également le Service régional de l'archéologie (DRAC Rhône-Alpes) et particulièrement Colette Laroche, ainsi que Joël Serralongue et Christophe Guffond du Service départemental d'archéologie de Haute-Savoie; et les bénévoles de l'association pour l'Etude et la Sauvegarde du Patrimoine Archéologique de Haute-Savoie (ESPAHS) pour leur investissement. Nous sommes reconnaissants envers le Prof. Vincent Serneels et le département des Sciences de la terre de l'Université de Fribourg pour la prise charge d'une partie des analyses. Nous tenons également à remercier Ludovic Baron, de l'Institut des Sciences de la Terre de l'Université de Lausanne, pour son expertise lors les prospections géophysiques et la mise à disposition des gradiomètres et du GPS différentiel; Ludwig Eschenlohr pour son concours aux prospections géophysiques; et la Prof. Marie Besse, du Laboratoire d'archéologie préhistorique de l'Université de Genève, pour la mise à disposition d'une station totale. Nous avons bénéficié de l'accueil bienveillant de Philippe et Jean-Michel Ailloud, du GAEC La Cour; qu'ils en soient chaleureusement remerciés. Pour terminer, nous aimerions exprimer notre plus grande gratitude envers les chercheurs associés (Isabelle André: céramiques gallo-romaines, Jocelyn Robbe: industrie lithique) et les équipes de bénévoles, étudiants et amateurs, qui nous ont accompagné sur le terrain, sans qui ces recherches n'auraient pas pu aboutir.

Bibliographies

- **Blondel L.** 1944. Chronique archéologique 1943. Genava, 22 : 21-60.
- **Charollais J., Busnardo R., Cardin M., Clavel B., Decrouez D., Delamette M., Gorin G., Lepiller M., Mondain PH., Rosset J., Villars F.** 1988. Carte géologique de la France à 1/50 000. Notice explicative de la feuille Annecy-Bonneville. BRGM, Orléans.
- **Crew P.** 1988. Bryn y Castell hillfort, Gwynedd, north Wales: a preliminary analysis of the ironworking debris. *In:* Scott BG, Cleere H (eds.), The Crafts of the Blacksmith. UISPP and Ulster Museum, Belfast, pp 91-100.
- **Crew P.** 2013. Twenty-five years of bloomery experiments: perspectives and prospects. *In:* Dungworth D, Doonan RPD (eds.): Accidental and Experimental Archaeometallurgy. HMS, London, pp 25-50.
- **Dufraisse A.** 2006. Charcoal anatomy potential, wood diameter and radial growth. *In:* Dufraisse A (ed.). Charcoal analysis: new analytical tools and methods for archaeology. Papers from the Table Ronde, Basel. Archaeopress, Oxford, pp 47-60.
- **Dufraisse A., Garcia Martinez MS.** 2011. Mesurer les diamètres du bois de feu en anthracologie. Anthropobotanica, 1 : 1-18.
- **Dunikowski C., Cabboi S.** 1995. La sidérurgie chez les Sénonis: les ateliers celtiques et gallo-romains des Clérinois (Yonne). Éditions de la MSH, Paris (DAF 51).
- **Duparc P.** 1955. Le comté de Genève. Genève, Mémoires et Documents de la Société d'Histoire et d'Archéologie de Genève, 39.
- **Eschenlohr L.** 2001. Recherches archéologiques sur le district sidérurgique du Jura central suisse. MCAH, Lausanne (Cahiers d'archéologie romande 88).
- **Eschenlohr L.** 2002. De l'Antiquité tardive au Haut Moyen Âge: le cas de la sidérurgie ancienne. Windler R (ed), De l'Antiquité tardive au Haut Moyen Âge (300-800) – Kontinuität und Neubeginn. SGUF, Basel (Antiqua 35), pp 149-155.
- **Eschenlohr L.** 2011. Un atelier médiéval de sidérurgistes: le bas fourneau de Lajoux, Envers des Combès (JU), fouilles 2006 à 2008. SJE, Porrentruy (Actes de la SJE 114), pp 123-152.
- **Eschenlohr L., Serneels V.** 1991. Les bas fourneaux mérovingiens de Boécourt-Les Boulies (JU/Suisse). SAP, Porrentruy (Cahiers d'archéologie jurassienne 3).
- **Georges-Leroy M., Bock M., Dambrine E., Dupouey JL.** 2011. Apport du lidar à la connaissance de l'histoire de l'occupation du sol en forêt de Haye. ArcheoSciences – Revue d'Archéométrie, 35 : 117-129.
- **Joukowsky E., Favre J.** 1913. Monographie géologique et paléontologique du Salève (Haute Savoie, France). Mémoires de la SPHN Genève, 37/4 : 295-523.
- **Kronz A.** 1998. Phasenbeziehungen und Kristallisationsmechanismen in fayalitischen Schmelzsystemen : Untersuchungen an Eisen- und Buntmetallschlacken (thèse de doctorat). Klaus Bielefeld Verlag, Friedland.
- **Leroy M., Mangin M., Laurent H., Boukezzoula M., Raïssouni B.** 2000. La sidérurgie dans l'est de la Gaule : l'organisation spatiale de la production de l'âge du Fer au haut Moyen Âge. Gallia, 57 : 11-21.
- **Leroy M., Merluzzo P., Le Carlier C.** 2015. Archéologie du fer en Lorraine. Fench Vallée, Knutange.
- **Maréchal JR., Armand H.** 1960. Recherches scientifiques sur la sidérurgie aux époques de La Tène et de l'occupation romaine en Savoie. *In:* Actes du 85^e congrès national des Sociétés savantes. Éditions du CTHS, Paris, pp 61-82.
- **Marguerie D., Hunot JY.** 2007. Charcoal analysis and dendrology: data from archaeological sites in north-western France. Journal of Archaeological Sciences, 34 : 1417-1433.
- **Mélo A.** 1999. Une prospection archéologique expérimentale. L'occupation humaine de la région entre Vuache et Salève dans le canton de Saint-Julien-en-Genevois, de l'Antiquité au Moyen Âge. *In:* Bertrand F, Chevrier M, Serralongue J (eds.), Carte archéologique de la Gaule : La Haute-Savoie. Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, Paris, pp 92-98.
- **Mélo A.** 2001. Le district sidérurgique du Salève (Haute Savoie, France): datations et phases d'exploitations. Minaria Helvetica, 21a : 65-69.
- **Mélo A.** 2008. Les Chartreux et la sidérurgie aux XII^e et XIII^e siècles. Le cas de la chartreuse de Pomier au pied du Salève (Haute-Savoie). *In:* Le travail au Moyen Âge. 127^e congrès national des Sociétés historiques et scientifiques, Nancy, 2002. Éditions du CTHS, Paris, pp 30-39.
- **Morton GR., Wingrove J.** 1972. Constitution of Bloomery Slags: Part II. Journal of the Iron and Steel Institute, 210 : 478-88.
- **Naville A.** 1867. Recherches sur les anciennes exploitations du fer du mont Salève. Mémoires et Documents de la Société d'Histoire et d'Archéologie de Genève, 16 : 349-381.
- **Paradis-Grenouillet S., Allée P., Servera Vives G., Ploquin A.** 2015. Sustainable management of metallurgical forest on Mont Lozère (France) during the Early Middle Ages, Environmental Archaeology, 20/2 : 168-183.
- **Paradis-Grenouillet S., Dufraisse A., Allée P.** 2013. Radius of curvature measurements and wood diameter: a comparison of different image analysis techniques. *In:* Damblon F (ed.), 4th International Meeting of Anthracology in Brussels. BAR Publishing, Oxford (British Archaeological Report Series 1063), pp 173-182.
- **Pelet PL.** 1993. Une industrie reconnue: fer charbon acier dans le Pays de Vaud, 2^e édition. MCAH, Lausanne (Cahiers d'archéologie romande 60).
- **Py V.** 2006. Mine charcoal deposits: methods and strategies. The medieval Fournel silver mines in the Hautes-Alpes (France). *In:* Dufraisse A (ed.), Firewood Economy: Analytical Tools and Methods. New Datas for Archaeology and Study of Societies, Techniques and Land Uses. BAR Publishing, Oxford (British Archaeological Report Series 1063), pp 35-46.
- **Quiquerez A.** 1992[1866]. De l'âge du fer: recherches sur les anciennes forges du Jura bernois. SJE, Porrentruy.

- **Rehder JE.** 2000. *The Mastery and Uses of Fire in Antiquity*. McGill-Queen's University Press, Montreal.
- **De Rijk P.** 1994. *Das Schmieden von Luppe und Eisen, eine Schlackebeschreibung*. Historisk-Arkaeologisk Forsogscentre, Lejre (Research Report 46).
- **Serneels V.** 1993. Archéométrie des scories de fer. *Recherches sur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale*. Lausanne (Cahiers d'archéologie romande 61).
- **Serneels V, Perret S.** 2003. Quantification of smithing activities based on the investigation of slag and other material remains. *In: Archaeometallurgy in Europe*. Associazione Italiana di Metallurgia, Milano, pp 469-478.
- **Tylecote RF, Austin JN, Wraith AE.** 1971. The mechanism of the bloomery process in shaft furnaces. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 209: 342-63.
- **Verna C.** 2017. L'Industrie au village : essai de micro-histoire (Arles-sur-Tech, XIV^e et XV^e siècles). *Les Belles Lettres*, Paris (Histoire 140).
- **Vivet JB, Bacheter X, Chauvel JJ, Fluzin P.** 2009. Métallurgie médiévale et forêt en prélude aux Grandes Forges de Paimpont (35). Centre régional d'archéologie, Alet (Les Dossiers du Centre régional archéologique d'Alet, numéro spécial).