

Radwan, Mieczysław

Méthodes appliquées en Pologne dans les recherches sur la sidérurgie ancienne des Monts Sainte-Croix

Organon 2, 131-153

1965

Artykuł umieszczony jest w kolekcji cyfrowej Bazhum, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych tworzonej przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego.

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie ze środków specjalnych MNiSW dzięki Wydziałowi Historycznemu Uniwersytetu Warszawskiego.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.



Mieczysław Radwan (Pologne)

MÉTHODES APPLIQUÉES EN POLOGNE DANS LES RECHERCHES SUR LA SIDÉRURGIE ANCIENNE DES MONTS SAINTE-CROIX

Les traces d'une activité sidérurgique ancienne, paraissant en masse sur un territoire de presque 800 km² de superficie et formant de nombreux groupes (nids) de fours à usage unique, constituent un phénomène sans véritable analogie sur le plan mondial. Il est hors de doute que les chercheurs d'histoire de la sidérurgie, du point de vue soit historique, soit technologique, nous ont fourni beaucoup d'indications de grande valeur pour nos recherches¹; néanmoins, il est apparu qu'un chemin nouveau devait maintes fois être frayé. Le problème fondamental en effet consistait dans la datation du phénomène, dans la reproduction du processus producteur dans toute son étendue, dans la définition de son potentiel productif et, enfin, dans la détermination de la structure sociale du milieu de production et de son rayonnement à l'époque de son développement maximum.

Le groupe d'histoire de la technique métallurgique polonaise, organisé en 1954 dans le cadre du Comité d'Histoire de la Science et de la Technique près l'Académie Polonaise des Sciences se chargea de réaliser des recherches appropriées. Les desseins initiaux, quoique d'étendue limitée, demandaient la coopération de nombreuses disciplines scientifiques et, parfois, l'application de méthodes spécifiques. Il s'ensuivit un accroissement annuel du nombre de travailleurs scientifiques et de leurs collaborateurs. Le rapport présent est le fruit de la coopération de spécialistes nombreux, venus pour la plupart du centre cracovien². Le groupe ne disposait pas d'un laboratoire proprement dit, mais mettait

¹ Je cite les auteurs principaux: A. A. Baykov, L. Beck, R. J. Forbes, R. François, J. W. Gilles, O. Johannsen, W. J. Yakovlev, B. Koltchine, J. Neumann, J. Percy, R. Pleiner, E. Salin, E. Schürmann, R. F. Tylecote et autres.

² J'exprime ici ma gratitude aux membres actifs du Groupe ayant coopéré au cours des recherches sur la métallurgie Sainte-Croix. Ce furent: K. Bielenin (archéologie), S. Małoszewski, J. Nieć (géologie), S. Holewiński, W. Rózański, J. Zimny (métallurgie), J. Kowalczyk, T. Stopka (géophysique) ainsi que des personnes que je ne cite pas et dont le travail avait été sporadique.

à profit d'autres laboratoires, surtout ceux de l'Académie des Mines et de la Métallurgie ainsi que ceux de l'Institut de Fonderie à Cracovie.

Les premiers travaux archéologiques méthodiques — sans compter ceux d'entre-deux-guerres, très vagues et non publiés — débutèrent au printemps 1956. Les premiers groupes de fours, mis à jour à Rudki dans le voisinage d'une mine de minerai, qui avait déjà été exploitée dans l'antiquité, surprisent les archéologues. C'étaient des nids de blocs de scories en disposition ordonnée. A partir de ce moment les observations devinrent de plus en plus nombreuses; il en était de même des problèmes à résoudre.

Enregistrement des groupes de fours. On procéda de bonne heure à l'enregistrement de nids de scories, que nous appellerons, par la suite, groupes de fours. On procédait, pour commencer, à la récolte des déclarations ou bien à la visite des lieux.

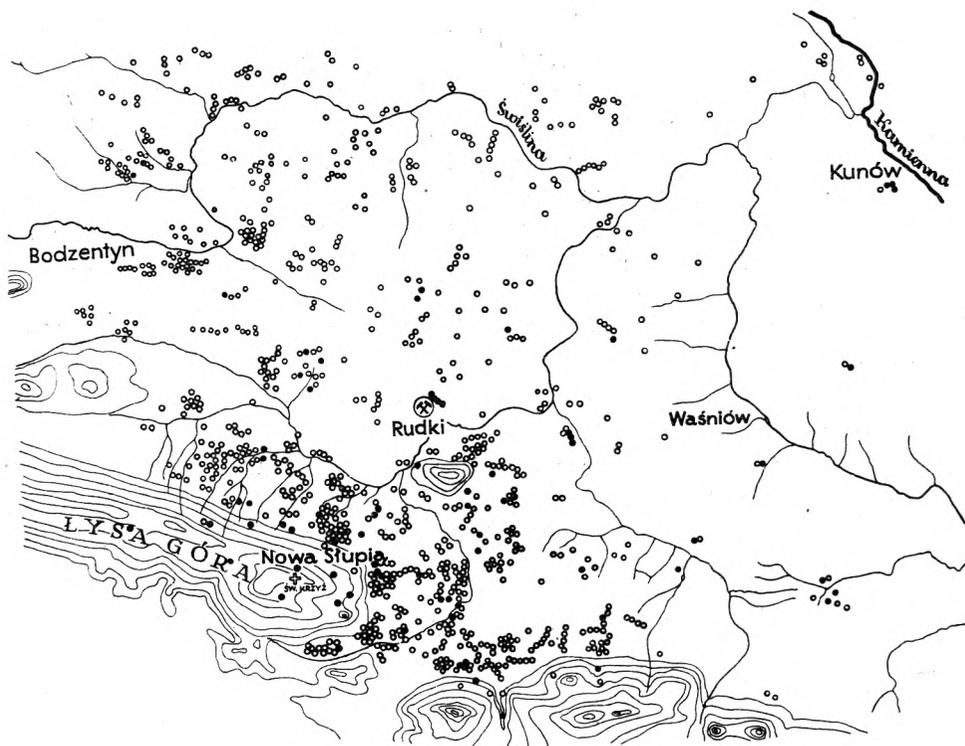


Fig. 1. Coupure de la carte d'une localisation des groupes de fours dans la partie sud de la région des Monts Sainte-Croix.

Légende: O — groupes de fours enregistrés après vérification; ● — groupes de fours étudiés par mise à jour. Elaboré d'après K. Bielenin



Photo K. Bielenin

Fig. 2. Exemple de photographie aérienne. Les taches foncées montrent pour la plupart des sites archéologiques

En 1958, on se décida à appliquer une méthode d'enquêtes par l'intermédiaire des écoles ou des conseils populaires locaux. Quarante pour cent au moins des questionnaires rendus contenaient des données positives. Après vérification, ces données servirent de base pour porter les groupes de fours sur une carte. À la fin de 1964, on était parvenu à enregistrer plus de 1800 groupes de fours (fig. 1).

En même temps que les enquêtes, on effectuait, pour la première fois, des vols au-dessus du terrain et on prenait les premières photographies aériennes. Dès lors, les observations aériennes portèrent chaque année sur des terrains nouveaux et sont même souvent réitérées au cours de plusieurs saisons ou à des heures différentes. Dans ce cas, on procédait à l'observation de la teinte du sol arable et de son séchage non-uniforme après la pluie; on étudiait l'inégalité du terrain, la croissance et le mûrissement inégaux de diverse intensité (fig. 2). Peu à peu, on parvint à distinguer beaucoup d'objets, en se basant sur les traces

visibles sur les photographies — non seulement des groupes de fours, mais des meules à charbon de bois et des fours de grillage de minerai les accompagnant, ainsi que des traces d'habitations.

Méthodes géophysiques. Les méthodes géophysiques se sont montrées extraordinairement utiles pour la localisation précise des groupes de fours ainsi que de la dimension de leurs entourages. Pour le moment, on applique la méthode dite de la balance magnétique. Elle utilise l'excitabilité magnétique des scories ferrugineuses, qui occasionne la formation d'un champ magnétique anormal assez puissant, vu la teneur en fer élevée des blocs de scories restés dans le sol. La grande utilité de cette méthode apparut dès les premières mesures, exécutées au mois d'avril 1961³ au site No. 4 de Nowa Słupia (fig. 3). Les diagram-

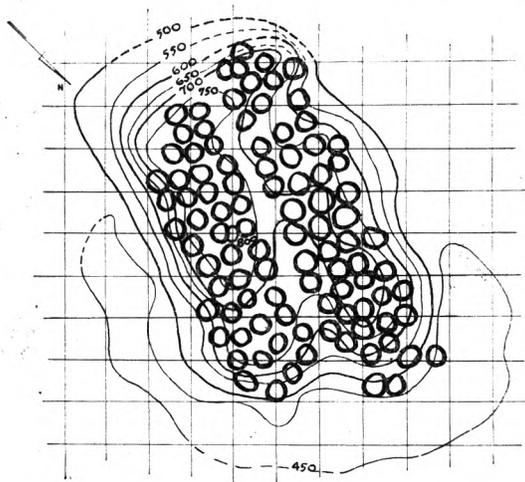


Fig. 3. Exemple de méthode géophysique. Nowa Słupia, site 4. On voit sur le fond d'isoanomalies un groupe de fours, mis au jour en 1961. Elaboré par J. Kowalczyk et T. Stopka

mes d'anomalies et le groupe de 99 fours mis à jour, ont décidé de l'introduction de cette méthode dans les plans de recherches de l'année suivante: On vient de réussir, au printemps 1964, l'identification dans le territoire du Parc National Sainte-Croix, sous une couche de feuilles sèches et de sol végétal, d'un dépôt important du minerai grillé.

On a aussi essayé d'employer la méthode de résistance électrique. Elle montra certaines qualités appréciables pendant les recherches

³ Les premières recherches furent effectuées et décrites par J. Kowalczyk et T. Stopka, voir *Badania magnetyczne w eksploracji stanowisk archeologicznych (Recherches magnétiques dans l'exploration des sites archéologiques)*, "Kwartalnik Historii Nauki i Techniki", No. 3/1962.

archéologiques dans des sites d'habitation. Récemment, on vient de faire un essai d'investigation à l'aide de la méthode au proton.

Mise à jour des groupes de fours. Après avoir choisi un endroit par ces méthodes ou par d'autres (actuellement en règle générale, on utilise des photographies aériennes et des documents géophysiques), on procède à la mise à jour du groupe de fours. On fixe d'avance la direction et éventuellement la superficie de l'ouverture. On enlève la terre meuble jusqu'à la terre ferme sur toute la superficie, où les fours apparaissent, en gardant pour investigations ultérieures tout objet rencontré. Les blocs de scories, ou bien les taches demeurant après l'extraction des blocs entreprise par la population du voisinage, sont dessinés sur un plan, selon une maquette préparée d'avance. Dans l'étape finale, on extrait les blocs pour visiter la partie inférieure des fours. Toutes les taches qu'on peut remarquer à la surface du terrain avant le début des recherches, sont soumises à une observation scrupuleuse.

Nous allons maintenant énumérer les matériaux qui, après avoir été préservés et enregistrés, passent aux investigations ultérieures, d'habitude au laboratoire.

1) Le matériel le plus commun est évidemment représenté par des scories dans divers états de préservation. On destine les blocs complets, demeurant dans une fosse à surface supérieure totalement intacte — ce qui est fort rare — aux musées.

2) Un cas à part était celui des scories menues, réagissant à l'aimant.

3) Les parois des fours se sont mal conservées surtout en sol arable, mais beaucoup mieux dans les terrains boisés. C'est donc dans ces terrains qu'on ramasse des fragments en forme de briques spécialement préparées, qui portent des traces du processus de fusion et fournissent des indications sur les températures régnant dans le four.

4) Les morceaux de charbon de bois extraits tantôt du bas de la fosse, tantôt d'un bloc cassé, sont étudiés pour définir la nature du bois carbonisé.

5) On ramasse scrupuleusement les fragments de poterie ancienne qui, de même que les monnaies très rares, servent provisoirement de base pour dater une trouvaille.

6) Les objets en fer se trouvent assez rarement. On a, par deux fois, rencontré une sorte de loupe forgée et plusieurs fois, des petits objets en fer. Ils sont soumis à des études spéciales.

7) Indépendamment des matériaux ramassés directement auprès d'un groupe de fours, on étudie les objets voisins des groupes de fours: meules à charbon de bois, fours à griller le minerai, ainsi que fours à réchauffer les loupes.

Nous allons examiner chacun des objets susdits séparément, en essayant de reproduire les processus technologiques.

Minerai. La charge des fours consiste en minerai provenant des alentours les plus proches. Sur tout le territoire où les scories ferrugineuses paraissent, on connaît différents gisements de minerai ayant été exploités dans les temps anciens. Le fournisseur le plus important est le gisement à caractère thermal de Rudki, district de Kielce. Le chapeau supérieur du gisement se composait autrefois d'hématites et de limonites, ainsi que de sidérites. Quant à ces dernières, il n'y a pas de preuves qu'elles fussent exploitées dans l'antiquité. Ce gîte, comme l'indiquent les études de recherches, a joué un rôle remarquable dans l'histoire de notre métallurgie aux temps de l'influence romaine. A cette époque, c'était une mine puissante, à technique minière bien développée. Les conditions d'extraction n'étaient pas faciles. Le gîte se trouvait dans des argiles plastiques, ce qui demandait un boisage renforcé. Ce gîte n'était pas d'ailleurs isolé. Le long de la rive droite de la Kamienna, une zone de limonites s'étendait de Parszów jusqu'à Bodzechów et plus loin. Près d'Ostrowiec un nid de sidérites est apparu. Au nord de la rivière Kamienna s'étendaient des limonites et des sables ferrugineux, abattus alors à ciel ouvert. On croit qu'il y avait des petits nids de minerai séparés, dont les traces se sont effacées.

La reconnaissance des gîtes autrefois abattus pour être transportés aux groupes de fours, n'est pas encore terminée. On peut prendre pour le moment, à titre d'hypothèse directrice, l'analyse chimique des scories provenant des groupes de fours voisins et surtout certains de leur composants, notamment: SiO_2 , souvent peut-être Al_2O_3 , CaO et MgO , MnO et partiellement Soufre et Phosphore. Une comparaison de l'analyse du gîte — au cas où celle-ci peut être réalisée — avec celle des scories du voisinage le plus proche permet, en principe, d'arriver à un résultat concret, à condition d'avoir toujours fait une discrimination, car il existe une certaine dispersion d'analyses du gîte et, de plus, une dispersion d'analyses de scories d'un seul four et d'un seul groupe de fours, due au procédé du type bas-foyer. Certains composants, comme SiO_2 , Al_2O_3 , CaO et MgO passaient entièrement dans les scories, une partie considérable du S est éloignée par grillage, MnO peut se réduire en quantité restreinte et passer dans le métal; quant au P, celui-ci passe aussi bien dans les scories que dans le métal. Ce dernier élément continue de jouer un rôle spécifique dans le problème d'identification du métal provenant de la région.

Nous allons nommer, en qualité d'exemple, des analyses extrêmes (minimum et maximum) des gîtes de minerai dans le territoire de la sidérurgie Sainte-Croix (table I).

Les analyses des échantillons de scories prélevés d'un seul bloc — de sa couche supérieure, du milieu et de la couche inférieure (des glaçons détachés, d'ordinaire) — démontrent une dispersion considérable.

L'analyse pétrographique montre aussi une différence, résultant de la nature du procédé au bas foyer. Les exemples peuvent être liés à l'un des gîtes les plus proches du groupe de fours choisi (table II).

Table I
Analyses des minerais au gîte

Gîte et sorte du minerai	Fe total	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅
Rudki: limonite	43-62	0,4-12	traces-2	traces-0,6
Rudki: "crème hématite"	23-65	0,06-27	0,0-12	traces-0,6
Tychów: limonite	13-47	14-61	3-7	0,2-0,3
Mychów; sidérite argilleuse cru	24-35	9-32	5-17	traces 0,3

Minerais grillés. Il n'y a aucun doute que les indications les plus précieuses pour déterminer le gisement du minerai, d'où le matériel de charge provient, peuvent être obtenues à la base des traces d'une poudre de minerai, qui résulte d'un grillage oxydant du minerai en tas, ramassées à l'aide d'un aimant. Ce phénomène vient de ce que l'hématite, ainsi que la limonite, après avoir perdu leur eau de cristallisation, acquièrent un réseau cristallin analogue à celui de la magnétite et s'appellent alors maghémite ($\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$). Les endroits de grillage ne sont pas faciles à trouver, car ils se fondent avec la teinte du sol arable et ne sont déchiffrables que pendant une courte période après labourage sans végétation. Les échantillons prélevés sur le terrain sous forme de poudre donnent, après avoir été lavés, un bon échantillonnage du minerai cru, en tenant compte que le minerai s'est diminué d'une certaine quantité d'eau de cristallisation et qu'une partie de l'oxyde Fe_2O_3 s'est réduite en FeO (ou alternativement en Fe_3O_4). L'analyse des minerais grillés est exposée ci-contre (table III).

Table II
Analyses des scories des groupes de fours

Groupe de fours-gîte	Fe total	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅
Nowa Słupia-Rudki	46,7-49,0	22,9-25,2	5,3-7,0	0,15-0,16
Osiny-Tychów	40,2-46,8	32,0-43,2	3,3-6,7	0,15-0,20
Mychów-Mychów	48,4-63,2	5,38-21,2	1,27-4,0	0,11-0,24

Le grillage du minerai peut être observé dans tout le territoire de gisement de scories ferrugineuses. Les minerais grillés, ramassés au voisinage des groupes de fours, sont des témoins directs de leur utilisation dans la charge et donnent, en connexion avec la caractéristique des

scories, une idée du déroulement du procédé métallurgique. Ces minerais grillés permettent, en outre, de fixer le rapport entre la charge du four et le gîte du minerai. Ils nous donnent, enfin, les moyens de faire des conjectures sur les conditions de transport; on peut prouver que les minerais étaient fournis à un groupe de fours, distant de plus de 12 km ⁴.

Table III
Analyse des minerais grillés (en poudre)

Groupe de fours—gîte	Fe ₂ O ₃	Fe total	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Pertes
Jeziorko—Rudki	74,92	52,72	16,22	4,35	0,24	—
Rudki—Rudki	74,92	51,72	12,36	4,39	nul	—
Osiny—Tychów	61,62	47,32	24,34	4,33	0,19	1,80

L'application d'un aimant pendant les recherches archéologiques nous fournit du matériel nouveau et parfaitement frais pour reproduire le procédé sidérurgique. Utilisé sur un groupe de fours en train d'être mis à découvert, un aimant a pu attirer de menus fragments de scories, contenant une particule de métal. Nous les avons appelé "grompes" (*grapie*) en polonais, en l'honneur du métallurgiste-poète polonais du début du XVII^e siècle, W. Roździeński, qui nous transmet ce terme dans son poème. Actuellement, nous sommes en possession des résultats d'études métallographiques de plusieurs dizaines de ces "grompes" ⁵ (fig. 4, 5, 6, 7). Ils nous ont permis d'étudier les phénomènes se produisant dans un bas foyer: nous y trouvons les traces d'une réduction à deux et à trois étapes, ainsi que d'une carburation initiale et d'une décarburation postérieure. En outre, on peut ainsi saisir le phénomène d'une oxydation du métal à basse température dans les conditions d'un long séjour dans la terre végétale ⁶.

En étudiant les "grompes" on observe, outre le métal situé pour la plupart au centre du fragment, l'enveloppe consistant en masse de scorie ou, plus souvent, en oxydes de fer. L'identification de ces composants présentait d'abord beaucoup de difficultés en vue des petites dimensions des "grompes" eux-mêmes, et c'est pour cette raison qu'on réalisa ces études par voie métallographique ⁷. Cette méthode profite de différentes

⁴ Voir à ce sujet l'exemple de dépôt de minerai mentionné à la p. 136.

⁵ Les études métallographiques des "grompes" ont été effectuées par A. Mazur, F. Nosek, J. Piaskowski, W. Różański.

⁶ Les études d'A. Mazur l'ont confirmé. Voir: A. Mazur, M. Radwan, *Zjawisko niskotemperaturowego utleniania znalezisk żelaznych. Konserwacja zabytków metalowych (Phénomène d'oxydation à basses températures de fers récoltés. Conservation des antiquités métalliques)*. "Biblioteka Muzealnictwa i Ochrony Zabytków", Série B, V, 1963.

⁷ Une méthode d'études des oxydes de fer dans les "grompes", se fondant sur les mesures de microdureté a été élaborée par A. Mazur.



Fig. 4. Un "grompe" du groupe de fours à Mirogonowice. Ferrite à grandeur de grain différenciée. De nombreux nitrures apparaissent sur les grains. Attaque au nital. Grossissement: 250. Elaboré par E. Nosek

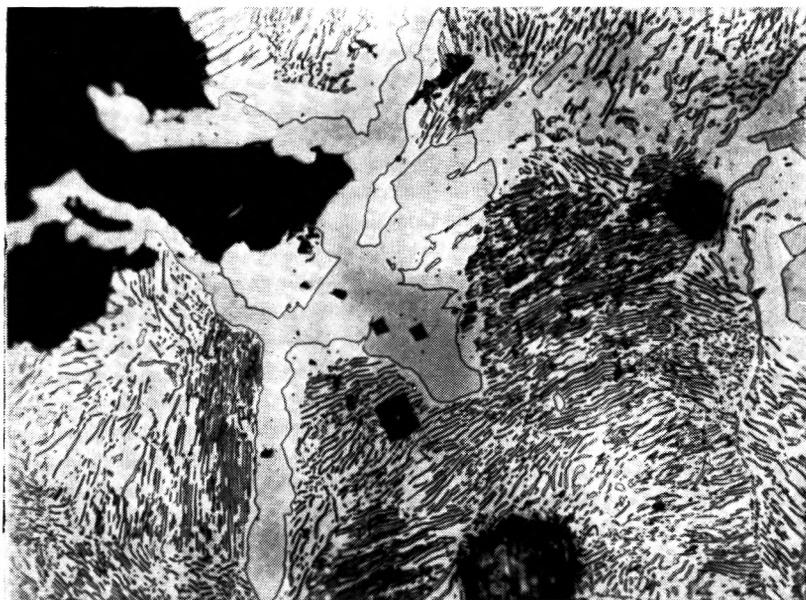


Fig. 5. Un "grompe" du groupe de fours à Wieloborowice. Structure perlitique avec ségrégations de cémentite. Les grandes empreintes de microdureté correspondent à la dureté de la perlite, les petites — à celle de la cémentite. Attaque au nital. Grossissement: 300. Elaboré par A. Mazur et E. Nosek

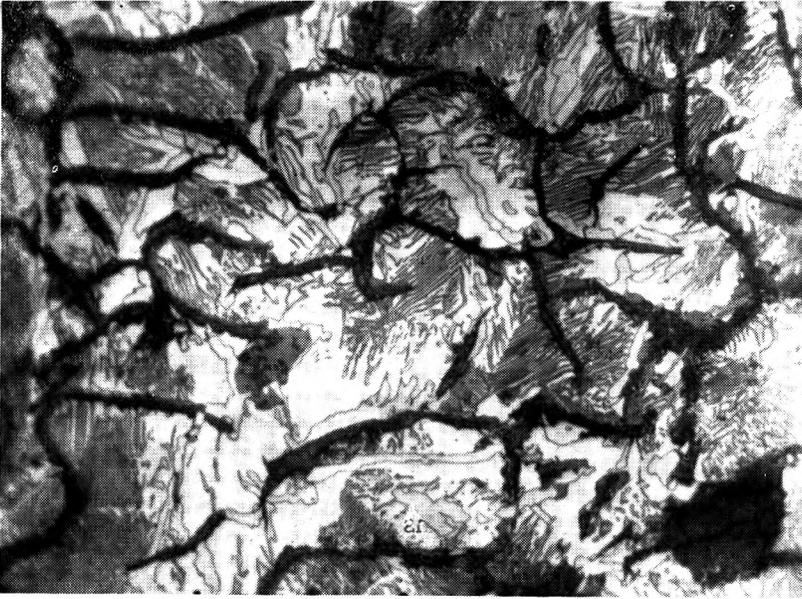


Fig. 6. Un "grompe" du groupe de fours à Łazy. Structure de fonte grise perlitique. On voit du graphite rubanné. Attaque au nital. Grossissement: 100. Elaboré par E. Nosek

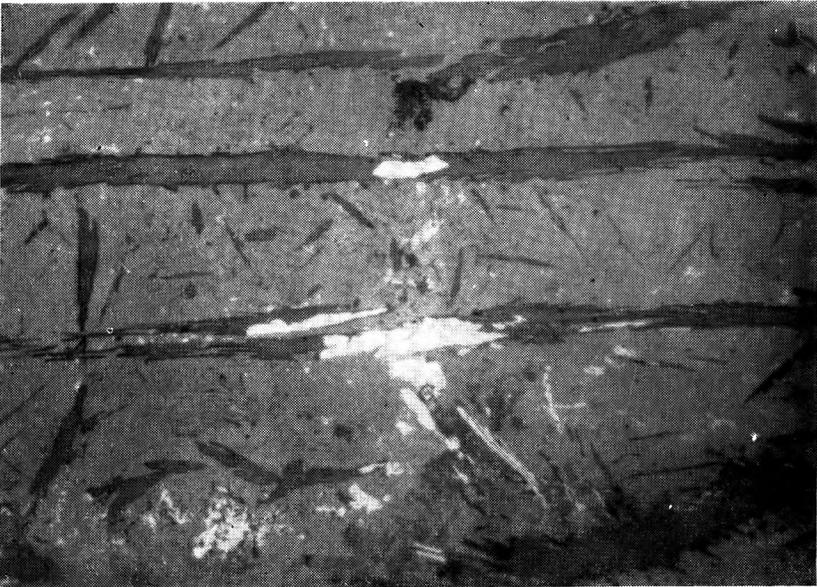


Fig. 7. Un "grompe" du groupe de fours à Wieloborowice. Une aiguille de cémentite partiellement corrodée sur le fond d'une masse d'oxydes. Les endroits blancs se rapportent à la cémentite non-corrodée. Attaque au nital. Grossissement: 500. Elaboré par A. Mazur et E. Nosek

particularités des phases identifiées: les différences de microdureté, la résistance aux agents chimiques, les propriétés optiques grâce aux observations en lumière polarisée, dans un champ de vision clair et obscur et dans une lumière de passage. Les phénomènes intéressants, faisant l'objet de nos études, sont ceux de carburation et de décarburation, qu'on peut rencontrer dans le métal des "grompes", représentant une pleine étendue de structures, en commençant par le fer ferritique, jusqu'aux structures propres aux fontes brutes et aux fontes de moulage. Des observations bien rigoureuses étaient d'ordinaire nécessaires pour résoudre le problème suivant: de quelle phase du procédé technologique pouvait provenir un exemplaire des "grompes" — du processus de réduction ou de la phase de réchauffage? On a dû recourir à des méthodes plus sensibles, comme études aux rayons X et au microscope électronique. Il n'y eut qu'un seul cas, dans lequel on parvint de réussir à identifier les déchets provenant de la phase de travail plastique (forgeage) Ce fut la base dont on se servit dans l'identification, entre autres, du site de Lazy, comme atelier de forgeron dans un habitat sidérurgique.

Les inclusions non-métalliques jettent une lumière supplémentaire⁸ sur l'essentiel des "grompes". La masse de base de ces inclusions consiste en oxydes de fer. Ce n'est que rarement qu'on peut rencontrer des inclusions du type fayalite, ce qui pourrait signifier que les "grompes" demeuraient à une température inférieure à celle de formation de la fayalite (1207°C). La plupart des inclusions fines, de forme à peu près sphérique, sont représentées par des oxydes. On n'a pas en général constaté dans les "grompes" d'inclusions déformées plastiquement, ce qui fait supposer que les "grompes" se formaient au bas foyer et non pendant le forgeage l'une loupe. En outre, le caractère des inclusions trouvées dans les "grompes" est différent de celui des produits finis.

Toutes les observations concordent: les "grompes" se forment au cours du processus au bas foyer et proviennent de la partie du four où se passe une carburation intense à une température de l'ordre de 1000—1100°C.

Les composants essentiels des scories, déterminés par les méthodes habituelles d'analyse chimique, étaient: Fe_2O_3 , FeO , Fe_{met} , SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , MnO , P_2O_5 ou P, ainsi que S. Nous avons introduit dans nos considérations un principe de déterminer Fe_{met} (métallique). D'ordinaire, ce composant ne dépasse pas 1% dans les parties des blocs de scories, provenant du bas des fours, mais il est arrivé, parfois, que cet indice soit dépassé dans certains fragments de scories prélevés dans un groupe de fours. Nous l'avons attribué à une masse de scories provenant apparemment de la partie supérieure d'un four où se

⁸ Etudes d'A. Mazur.

passé la réduction. Nous y voyons d'ordinaire une certaine liaison avec le phénomène des "grompes".

L'analyse pétrographique des scories⁹, exécutée aussi bien dans la lumière réfléchie que dans celle de passage, indique une hétérogénéité des structures. Les ferrosilites avec une addition d'une molécule Tchernak, à savoir $\text{FeSiO}_3 \cdot m$ (Fe, Ca, Mn), sont prépondérants; en outre on a constaté la présence de la glaçure, de la magnétite, rarement de la wustite; les composants chimiques montraient souvent beaucoup d'hétérogénéité. Les différences dans la composition minéralogique proviennent des différences de température régnant au four, ainsi que du régime de refroidissement.

Le problème des éléments présents dans les scories comme traces, et déterminés par la méthode à étincelles, n'apporte rien de nouveau dans nos études. On en vient donc à élaborer un principe nouveau. Nous nous attendons aux résultats essentiels, pas seulement pour les scories, mais surtout pour le métal produit à partir d'un minerai déterminé.

Combustible. Une analyse morphologique des petits morceaux de charbon provenant soit des fosses en-dessous des blocs, soit des blocs brisés, montre que 72% des spécimens proviennent des conifères, dont 63% du bois de sapin, et que 28% appartiennent au bois feuillé, hêtre et chêne pour la plupart.

La technique de la carbonisation a été adaptée aux besoins essentiels. Les meules à charbon de bois sont partiellement enfoncées dans le sol et destinées à effectuer une carbonisation réitérée. On l'a prouvé par des coupes et des analyses du contenu des fosses, qui montraient une haute teneur en K_2O , provenant des cendres, ainsi que de la braise de charbon. Grâce à la mesure des fosses et à son interprétation, le volume hypothétique d'une meule paraît s'élever à 10 m³ environ. Dans ces conditions, et en fonction du bois carbonisé, une meule devait produire 600—750 kg de charbon d'assez bonne qualité.

Les parois de fours. Les études des parois de fours, ainsi que revêtement inférieur de la fosse ont montré que la partie inférieure d'un four était d'ordinaire enduite d'argile grise ou de glaise ou bien directement de loess, sans aucune trace d'amaigrissement. Quant à la partie supérieure représentant le laboratoire (le puits) proprement dit, elle est construite en briques orthogonales, avec des plantes hachées distinctes. Dans les terrains à loess, le matériel de base est le loess de la terre ferme. Dans les terrains sablonneux, au nord de la rivière Kamienna, l'argile fluviale prévaut. Les analyses chimiques du matériel des parois ont montré une haute teneur en SiO_2 , dans les limites de 91—96%. C'est donc un garnissage nettement acide. Des analyses botaniques des

⁹ Elaboré par S. Jasińska de la Chaire de métallurgie de la fonte brute de l'Académie des Mines et de la Métallurgie à Cracovie.

plantes hachées démontrent, pour 30 analyses d'herbes sauvages, un grain de seigle, deux d'orge et deux de froment. Ceci pourrait indiquer une certaine liaison des groupes de fours avec la culture des champs.

Les fours étaient construits, comme on le peut conclure grâce à l'examen du matériel archéologique, de briques non séchées, encore plastiques, le tout étant parfois renforcé par des lattes, fendues de bûches (fig. 8). Les trous de soufflage étaient d'ordinaire modelés dans

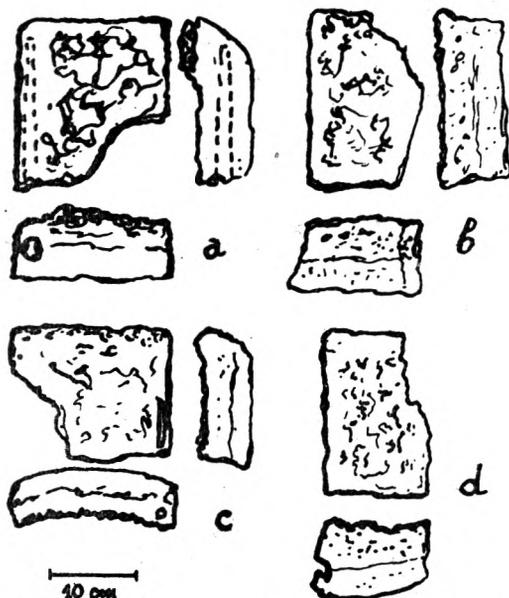


Fig. 8. Plusieurs fragments choisis parmi les briques. Le fragment 1 montre des traces de renforcement par une latte en bois, le fragment 3 a été formé distinctement en arc.
D'après K. Bielenin

une brique; on n'utilisait pas de tuyères en qualité d'organe séparé. On peut constater en général, qu'en mettant à jour environ 90 groupes comportant plus de 3300 vestiges de fours séparés, on n'a pas une seule fois trouvé un puits conservé entièrement, donnant l'image de l'original. La reconstruction de la forme d'un four aux dimensions géométriques propres a été accomplie grâce aux analyses des fragments de revêtement de fours.

La surface intérieure des briques ramassées pendant une mise à jour d'un groupe de fours, renseigne souvent sur le régime du four. On a rencontré des grumeaux de minerai, ce que confirme l'analyse chimique, collés aux briques de la partie supérieure du puits. Ils pouvaient se produire à une température supérieure à 600°C. Les briques de la partie inférieure du puits au voisinage des trous de soufflage, montrent des traces d'attaque, ainsi qu'une glaçure relativement épaisse. Les points de

ramolissement de cette couche atteignent 1070—1130°C, tandis que les points de fusion 1450—1495°C. Au-dessous de la glaçure, le matériel des briques montre, dans presque tous les exemplaires, à une profondeur de 1 à 2,5 cm, une structure poreuse (“mousseuse”). La formation d’une telle structure est déterminée par des températures d’environ 1150°C¹⁰. C’est une indication supplémentaire sur le régime thermal dans nos fours.

Céramique. Le matériel essentiel pour une chronologie d’un groupe de fours — c’est la céramique. Jusqu’ici, il est malheureusement rare que les fragments de poterie trouvés soient assez grands pour permettre de reproduire le vase entier. On a réussi à ramasser des matériaux plus riches dans les sites de colonisation, car les groupes de fours ne

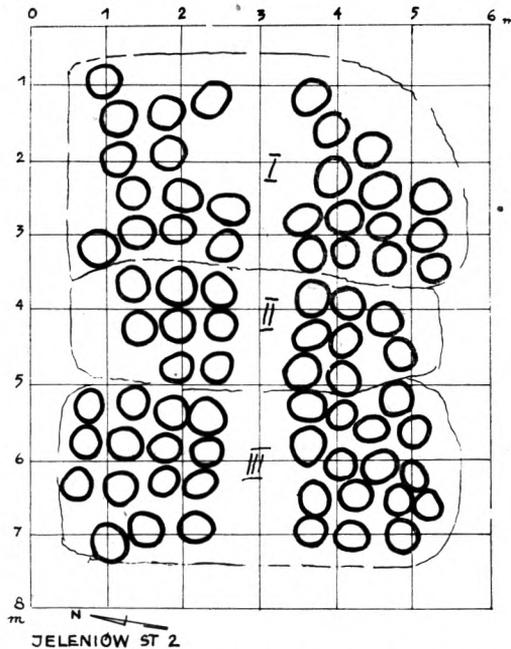


Fig. 9. Jeleniów, site 2, Groupe de 74 fours. On peut remarquer trois périodes:
1) 13+14=27 fours; 2) 8+8=16 fours;
3) 15+16=31 fours. D’après K. Bielenin

donnent en règle générale que du matériel fragmentaire, permettant pourtant de constater une liaison avec la céramique de colonisation. Le docteur K. Bielenin a indiqué dans sa thèse de doctorat ès-sciences¹¹ les méthodes d’évaluation de ces fragments. Dans ce but, il effectua une

¹⁰ Elaboré par M. Budkiewicz. Voir: M. Budkiewicz, M. Radwan, *Uwagi o “żużlu spienionym”* (Notes sur les “scories mousseuses”). “Archiwum Hutnictwa”, No. 1/1961.

¹¹ K. Bielenin, *Starożytne hutnictwo żelaza rejonu Gór Świętokrzyskich* (Ancienne sidérurgie de la région des Monts Sainte-Croix), sous presse.

analyse des matériaux essentiels, grâce aux études portant sur les trouvailles analogues, ensuite il établit les éléments caractéristiques (par exemple dans les groupes de fours — les blocs de scories, les déchets de la production, etc.) et les éléments accidentels. Bien que cette méthode ne paraisse pas tout à fait satisfaisante aux archéologues, elle reste, dans notre cas, la méthode unique et sert à élaborer la chronologie de l'ensemble.

Groupe de fours comme ensemble. Les observations portant sur la disposition des groupes de fours, après leur mise à jour permettent de qualifier certains groupes comme organisés et d'autres comme non-organisés. Les groupes organisés de fours, à nombre de fours

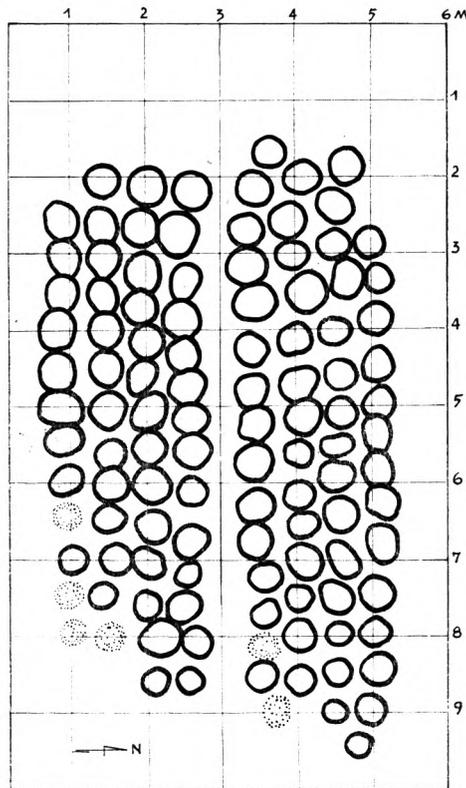


Fig. 10. Groupe de fours à deux files, à quatre fours par rang: $53+59=112$ fours. Elaboré par K. Bielenin

distinctement supérieur, se caractérisent, en principe, par leur ordre géométrique: deux files de fours, à 3—4 et, exceptionnellement, à 2 ou 5 fours par rang. Les deux files sont séparés par un sentier étroit, distinctement visible. La symétrie des deux files est parfois grande: comme si l'un était réflexion de l'autre dans le miroir. Les groupes non-organisés,

à nombre de fours considérablement inférieur, à disposition confuse, sont peut-être la preuve d'une production à domicile (fig. 9, 10).

Un groupe organisé possède, outre un nid de fours, des installations coopérantes: meules pour la carbonisation du bois, fours à griller le minerai et installations pour réchauffer les loupes.

Table IV
Chronologie des groupes de fours

Période	Années	Groupes de fours	
		organisés	non-organisés
La Tène avancée	100 a. n. è.		
	jusqu'à 0 n. è.	—	1
Haute romaine	0—10 n. è.	—	5
Romaine moyenne	150—300 n. è.	14	18
Romaine avancée	300—400 n. è.	40	—
Haut Moyen Âge	400—1000 n. è.	3	5

Statistique. Grâce aux nombreux matériaux amassés et après vérification, K. Bielenin vient, à la fin de 1964, d'enregistrer 1805 groupes de fours. À notre avis, c'est probablement la moitié du nombre de groupes de fours qui ont été en marche dans le territoire en considération, pendant le premier millénaire de notre ère.

Jusqu'à présent, on a étudié 3308 fours appartenant à 86 groupes. On n'a pas toujours pu étudier le groupe entier, parfois des obstacles objectifs, comme semences ou endommagement partiel du groupe étaient tels, qu'ils ne permettaient pas d'établir le nombre effectif des fours. C'est pourquoi les chiffres suivants ont été calculés en moyenne. Parmi 86 groupes de fours étudiés, 57 groupes avec 4300 fours appartiennent au type organisé et 29 groupes avec 300 fours — au type non-organisé. Un simple calcul montre qu'on a, jusqu'à présent, examiné 2,5% environ de groupes de fours, jadis actifs. K. Bielenin rapporte les groupes de fours examinés aux périodes historiques différentes (table IV, fig. 11).

En admettant que le nombre moyen des fours d'un groupe organisé du premier millénaire de notre ère se maintienne au même niveau que le nombre des fours de groupes organisés étudiés jusqu'ici, c'est-à-dire 75 fours, tandis que dans les groupes non-organisés on trouve 11 fours environ, on peut conclure que plus de 90% du total des fours ne travaillaient qu'un temps relativement court, à savoir 250—300 ans.

Il faut souligner que le type de four de Sainte-Croix, avec une fosse à scories et un puits au-dessus du niveau du sol, s'est conservé, dans sa forme essentielle, pendant douze siècles au moins; ce n'est qu'à la fin de cette période qu'on peut remarquer un agrandissement du diamètre du puits et, par conséquent, de la capacité du four.

Fusions expérimentales. Presqu'en même temps quand on suivait les recherches en campagne, le rassemblement des matériaux et les études postérieures au laboratoire, une idée est venue: faire des expériences avec fusion, dans les conditions qu'on a préalablement déterminées par la mise à découvert des groupes de fours. Quoique le

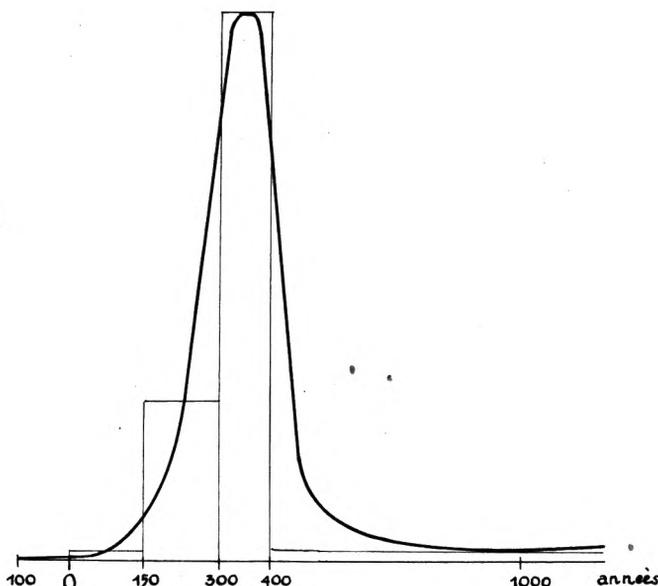


Fig. 11. Image comparative de la capacité de production de la sidérurgie des Monts Sainte-Croix au premier millénaire de notre ère. Elaboré par K. Bielenin et M. Radwan

procédé métallurgique lui-même, décrit dans les publications sur ce sujet, parût clair, de nombreux nouveaux problèmes sont alors surgis, demandant une solution. Ces problèmes embrassaient l'ensemble entier de toutes les activités et opérations particulières, l'ensemble des outils nécessaires non retrouvés jusqu'aujourd'hui; d'ailleurs il est douteux s'ils le seront jamais. Malgré la preuve par l'expérience de la réalisation par soufflage artificiel, on n'a trouvé aucun débris de soufflets.

Les expériences devaient fournir des données pour établir les indices techniques et économiques, les besoins de la main-d'oeuvre nécessités par certaines opérations et leurs conséquences, puis des renseignements sur l'effectif du personnel, son habileté et, enfin, sur l'organisation du travail dans le groupe de fours.

De tels expériences ont été commencées en 1957 et, dès lors, on les a réalisées presque chaque année. On modifiait la construction du four, on changeait les espèces de minerai et de charbon de bois, on introduisait

de différentes variétés de soufflage et, en outre, ce qui était d'importance primordiale, on améliorerait la technique de mesure.

Les résultats des expériences pouvaient être évaluées de la manière suivante: le procédé au bas foyer, réalisé dans un four de laboratoire d'un volume de 0,05 ou 0,03 ou même de 0,01 m³ (en comptant que le volume du laboratoire s'étendait de l'axe de soufflage jusqu'au gueulard) pouvait donner des résultats positifs, en cas où la fusion était conduite d'une façon rigoureuse. On constata que les perturbations, provenant de telle ou telle cause influençaient tout de suite l'opération au four. C'est pourquoi il y avait beaucoup d'échecs dans les fusions, après occasionner d'ailleurs beaucoup de contributions intéressantes.

Les échecs n'étaient causés que par quelque déviation d'une certaine norme. La cause la plus fréquente des perturbations dans la marche d'un four sont: la formation d'un accrochage de la charge, résultant d'un chargement de morceaux de minerai ou de charbon trop gros; la formation de l'éponge métallique dans un endroit impropre. Voilà les causes de la marche défectueuse d'un four (marche d'un seul côté).

B u t d e s r e c h e r c h e s. Notre but essentiel n'était pas l'obtention d'une loupe la plus lourde possible, mais l'observation minutieuse du cours du procédé métallurgique lui-même. Dans ce but, on a conduit les expériences, d'ordinaire, dans deux fours. Après avoir fondu une quantité déterminée de minerai, on refroidissait lentement l'un des fours, en murant toutes les ouvertures, le gueulard compris. Après vingt quatre heures au moins, on démontait le four, quand il était tout à fait froid. Dans ce cas, il s'agissait de saisir les phases particulières de réduction et d'obtenir une éponge métallique dans la phase finale. Quant à l'autre four, on le démontait ordinairement encore chaud et on essayait d'extraire en son intégrité l'éponge qui s'y était formée et de la forger.

En vertu d'un arrangement de l'Académie Polonaise des Sciences ainsi que l'Académie des Sciences Tchécoslovaque on a procédé à des expériences après mise en commun des conditions techniques. La première expérience commune fut conduite en Pologne, en 1962, la seconde en Tchécoslovaquie, en 1964.

La nature du minerai des expériences est fort variée. Des difficultés essentielles sont nées pendant la fusion des minerais de teneur élevée en silice: en 1963 on a fondu du minerai marécageux à 33,71% Fe et 36,53 SiO₂. Le rendement de fer en résultant était minime, mais c'était un minerai de haute teneur en phosphore et l'intention était d'obtenir des indications concernant la transformation du phosphore dans les scories et dans le métal.

Nous avons prouvé expérimentalement l'utilité du grillage du minerai: les minerais très riches et compacts se fendent par suite du grillage, les

minerais limonites perdent leur eau de cristallisation, le soufre est éliminé à 85—90% et, après flottation, jusqu'à 98%. Tous les minerais que nous avons grillés acquièrent des qualités magnétiques. C'est de cette manière que nous avons pu constater l'identité du minerai grillé (des "poudres"), amassé avec l'aimant sur le terrain.

La construction d'un four Sainte-Croix fut élaborée à la base de mesures des "briques" ramassées dans les groupes de fours. Il n'y avait pas d'indications concernant le nombre de trous de soufflage.

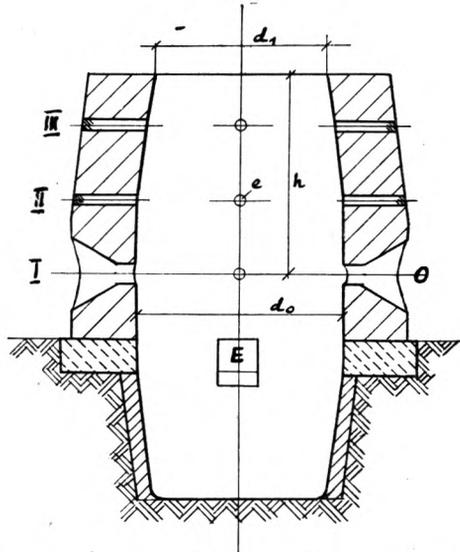


Fig. 12. Four expérimental du type Sainte-Croix. Les dimensions ont été fixées selon la grandeur des briques ramassées dans les groupes de fours. d_0 — diamètre au niveau des trous de soufflage o correspond au diamètre des blocs rencontrés le plus souvent et se monte à 40—45 cm. La hauteur h en commençant à partir des trous de soufflage jusqu'au gueulard (de diamètre d_1) se monte à 40—45 cm. e — les trous auxiliaires (I, II, III). E — le trou auxiliaire inférieur.

Elaboré par M. Radwan

C'est l'expérience qui décida: deux trous opposés donnèrent une disposition symétrique, ce qui s'explique par la symétrie des fours. Un essai de fusion avec soufflage disposé à un angle de 90° (rapprochement des trous) a pour conséquence la marche d'un seul côté. Un détail original, dont on ne trouve pas trace dans les ouvrages publiés, concerne un trou supplémentaire inférieur, disposé au-dessous des trous de soufflage. L'expérience démontra qu'il ne servait qu'à réchauffer la partie inférieure du

four. Les traces de ce trou sont visibles sur un grand nombre de blocs (fig. 12).

Les mesures des températures dans un four expérimental sont notées à trois niveaux à l'aide des thermo-éléments. Elles démontrent qu'indépendamment du genre de soufflage, soufflet ou ventilateur, la disposition des températures en plaine verticale passant par les trous de soufflage se présentait comme suit: le maximum se manifestait à une distance de la paroi de $1/8$ du diamètre environ, le minimum se manifestait au centre du four.

Les mesures faites dans des plaines disposées à 90° montrent le même phénomène: un maximum à $1/8 d$ et un minimum au centre, cependant, la température à $1/8 d$ est inférieure à celle dans la plaine qui passe par

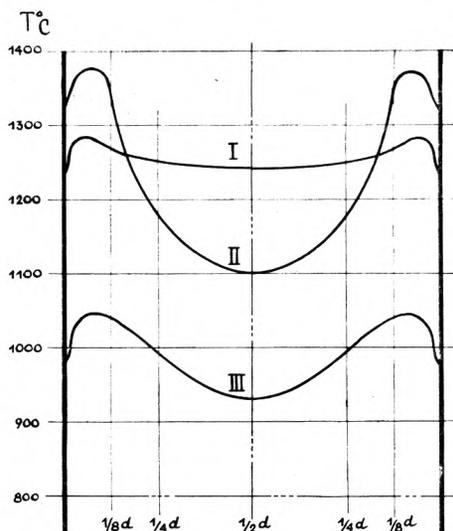


Fig. 13. Disposition typique de températures dans un four expérimental. Trois courbes correspondent aux mesures à trois niveaux du four:

I — directement au-dessus des trous de soufflage; II — dans la partie moyenne du four; III — auprès du gueulard. Elaboré par M. Radwan

les trous de soufflage. Les diagrammes annexés démontrent ce phénomène. En vertu des résultats des mesurages et de leur interprétation on peut déterminer la zone de combustion dans chaque cas (fig. 13).

La courbe décrite prouve que la marche d'un four du type Sainte-Croix, à disposition symétrique de soufflage, avait un cours presque périphérique, c'est-à-dire que la zone des températures maxima se trouvait près des parois. Les fragments de parois, quelque peu fondus et

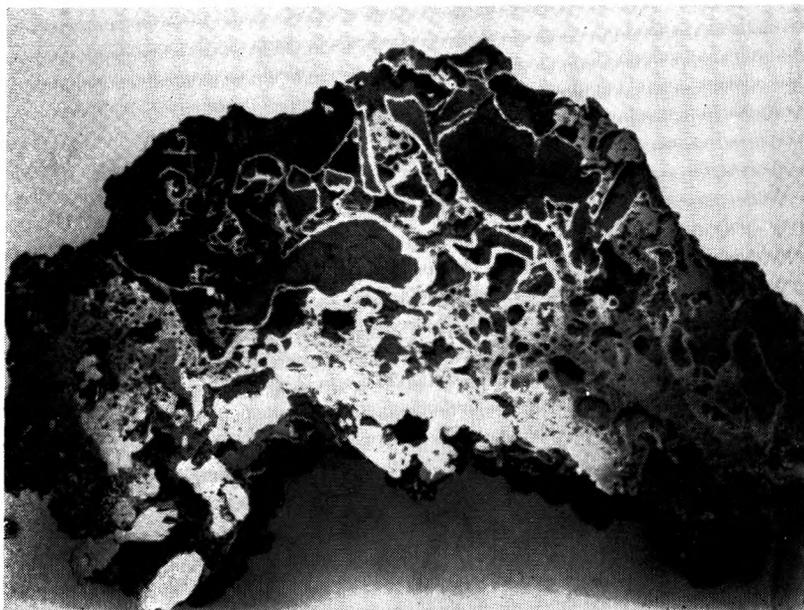


Photo E. Nosek

Fig. 14. Une éponge brute en coupe avant le forgeage. Taches blanches, c'est le métal (Fe). Dans la partie supérieure les lamelles du métal entourent, selon la règle, de petits morceaux de charbon. Les scories se montrent dans cette photographie principalement dans les parties latérales. La scorie en question s'est détachée du bas pendant l'extraction de la loupe



Fig. 15. Une demie-éponge, semblable à celle de la fig. 14, a été à l'origine de la forge d'une billette. Longueur 10 cm environ. Elaboré par A. Mazur et E. Nosek

couverts de glaçure, ramassés dans les groupes de fours, se laissent éclaircir par nos expériences.

Les conditions du mesurage des gaz sont analogues à celles des températures. Le teneur maximum en oxyde de carbone se manifeste à une distance de $1/8 d$ de la paroi. Pendant une descente tranquille de la charge, la teneur en CO varie dans les limites de 24—29%, la teneur en CO₂ est à proportion plus basse.

Démontage des fours. Après refroidissement du four on le démonte par couches, en allant de haut en bas. Le contenu du four, après séparation du charbon non brûlé par flottation dans l'eau, est séché et confié, en totalité, à l'analyse chimique.

Nous notons les données d'une expérience faite en 1962: la charge descend 3 cm; la couche supérieure de 10 cm montre du charbon et du minerai partiellement fritté; la deuxième couche, de 10 à 20 cm de profondeur contient du fer métallique dans une proportion de 8,61%, la couche suivante 17,0% de Fe_{met}; plus bas se trouve une éponge métallique avec des scories et du charbon, décelables sur la photographie. Les résultats prouvent que la réduction dans les fours commençait assez tôt. Dans la troisième couche on a trouvé des "grompes" de structure ferritique, à gros grains, avec dégagements distincts de nitrures.

Dans la couche inférieure, celle de soufflage, se dessine une éponge de métal avec des scories et des morceaux de charbon. Le tout est découpé à la scie et soumis à des études métallographiques. Vu le soufre trouvé dans le minerai de la charge, on soumet l'éponge à l'essai Baumann. L'essai montre tout de suite un phénomène de distribution disproportionnée: le soufre a presque disparu dans la partie inférieure du métal compact, tandis que des taches paraissent distinctement dans la partie supérieure, où le métal forme une éponge de lamelles entourant les morceaux de charbon (fig. 14, 15).

La disposition des températures et les variations de teneur en CO dans le four témoignent d'une marche inégale du four provoquant des disproportions des composants dans le métal et une dispersion de la composition chimique des scories.

La totalité du métal montre une prépondérance de structure ferritique — la carburation visible de la loupe paraît à certains endroits à un degré de réduction maximum et atteint 0,2 environ au plus. Le rendement du métal dans cet expérience monte à 26%, bien que le bilan ait prévu 33%, en tenant compte des pertes de réchauffage: le procès de fusion ayant été arrêté à dessein.

Le phénomène de la transition du phosphore dans le métal et les scories fut le but principal des expériences de 1963. On prend alors du minerai marécageux à teneur en phosphore relativement élevée — 3,54% P₂O₅, teneur en fer total basse Fe_{tot} —

33,71% et en SiO₂ élevée — 36,53%. Ces chiffres se rapportent au minerai grillé.

La fusion terminée, le tout fut extrait du four et soumis au concassage et, ensuite, au triage magnétique. Un échantillon homogénéisé, d'une granulométrie de 0,1 fut soumis au triage magnétique par la voie humide et la voie sèche. On obtint quatre fractions: 1) très fortement magnétique, 2) fortement magnétique, 3) faiblement magnétique, et 4) une fraction

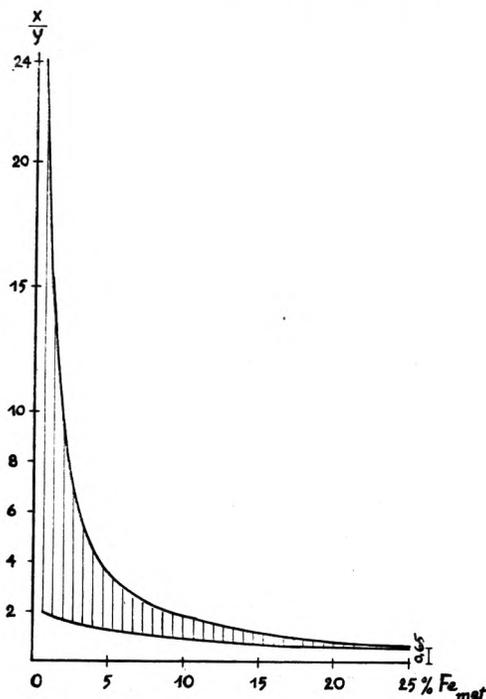


Fig. 16. Diagramme de transition du phosphore dans les scories et dans le métal par le procédé au bas foyer

Légende: $\frac{X}{Y} = K$ — indice de corrélation; X — coefficient de transition dans le métal; Y — coefficient de transition dans les scories; Fe_{met} — quantité de fer de réduction. Les deux courbes montrent les valeurs extrêmes de dispersion, elles se rapprochent asymptotiquement à $K = 0,65$. Elaboré par M. Radwan

amagnétique. On fit une analyse chimique de chaque fraction, en déterminant Fe₂O₃, FeO, F_{met} et P₂O₅. L'interprétation mathématique permet de saisir la corrélation, c'est-à-dire le rapport de transition du phosphore dans le métal et dans les scories en dépendance du Fe_{met} résultant. Les résultats sont montrés dans la table V et dans le diagramme (fig. 16).

La table V comme le diagramme montrent une grande dispersion du phénomène de corrélation. On peut l'expliquer, entre autres, par: 1) la

présence, dans les minerais marécageux, des minéraux apatite et vivianite, contenant du phosphore; certaines apatites sont des combinaisons très stables et ne se dissocient pas en oxydes dans un mélange avec de la silice, même à une température de 1500°C; quant à la vivianite, celle-ci peut se réduire encore dans la zone de désoxydation indirecte à 600—800°C et peut passer dans le fer à une température de 1000—1200°C, ce qui est possible dans les fours du type Sainte-Croix; 2) ces minéraux se rencontrent tous les deux dans nos minerais marécageux; 3) la transition du phosphore dans le métal dépend aussi du cours de la réduction du fer et du régime de carburation. E. Schürmann a mis l'accent sur ce fait.

Ce problème est d'importance pour des essais en cours ayant pour but l'identification du métal produit dans la région des Monts Sainte-Croix. Des expériences comprenant la fusion du minerai marécageux à haute teneur en phosphore, mais plus riche en Fe et plus pauvre en SiO₂, furent effectués pour une seconde fois au mois de septembre 1964; les études de laboratoire ne furent pas terminées avant la fin de l'année.

Table V
Dépendance du coefficient de corrélation
X : Y du Fe_{mét}

Fe _{mét}		0,62	1,24	3,97	8,44	15,0	20,0	25,0
$\frac{X}{Y} = K$	max.	24,3	13,4	4,36	2,08	1,18	1,15	0,68
	min.	2,00	0,91	0,71	0,67	0,66	0,65	0,65

Indices techniques et économiques. La mise à profit du Fe contenu dans la minerai cru variait beaucoup selon l'espèce de minerai: l'hématite de la mine de Rudki donnait même un rendement de 33%; les limonites des types de Tychów: jusqu'à 18%; les minerais pauvres et marécageux parfois 10 à 15%. Il n'y a pas de gisements de ces derniers minerais dans la région Sainte-Croix.

La consommation de combustible, en vertu d'une quantité considérable consommée pour le réchauffage du four à fusion, d'abord, et de la loupe au four à réchauffer, ensuite, ainsi que pour la fusion elle-même, est d'une grande importance et va jusqu'à 20 kg de charbon par kilogramme de loupe forgée.

Les blocs de scories apparaissant sur le terrain sont pris pour unités de calcul. On admet que le poids moyen (conventionnel) d'un bloc complet (pas endommagé) s'élevait à 100 kg. C'est un poids plutôt moindre qu'en réalité, mais il permet de mieux formuler le régime économique

d'un groupe de fours organisé. Pour obtenir une telle quantité de scories, il faut fondre 160—170 kg de minerai cru du gîte de Rudki. La fusion de cette quantité demande: 30 kg environ de charbon pour le réchauffage du four, 210 kg environ pour la fusion (en admettant une proportion de 1,2) et, enfin, 50 kg environ pour le réchauffage de la loupe. Le total monte donc à 300 kg à peu près. Dans ce but, il faut carboniser environ 5—6 stères de bûches. Le résultat final donne 15—18 kg de loupe forgée.

Effectif d'un groupe de fours; nécessités en main-d'oeuvre. Pour construire un four et le préparer à la production, il faut exécuter les travaux suivants: creuser une petite fosse, l'enduire de glaise, apporter de l'eau, se procurer de l'argile et hacher des plantes, ensuite préparer des briques pour le puits (la superstructure), construire le four, le sécher lentement et le réchauffer, ensuite, pendant 12 heures au moins et, enfin, monter les soufflets. Cela représente 3 journées de travail pour 3 hommes.

Pour effectuer une fusion il faut exécuter: le concassage du charbon, le grillage du minerai et son broyage, la préparation des outils ainsi que du four à réchauffer les loupes; il faut, ensuite, effectuer la fusion elle-même, le service de deux soufflets pendant 24 heures sans arrêt et, pour finir, forger la loupe. C'est un travail de 3 jours pour 5—6 hommes.

Ce calcul, quoique approximatif, explique la provenance de deux files de four, séparés par un sentier. Il faut, en effet, deux groupes travaillant simultanément en deux endroits: l'un prépare un four nouveau, l'autre effectue la fusion. Un cycle étant fini, ils échangent leur lieu de travail. Ceci se confirme par le fait, que les files droite et gauche ont souvent le même nombre de fours, mais différent, parfois, d'un four ou deux.

Le troisième groupe s'occupe de la carbonisation du bois. Un charbonnier expert, ayant un ou deux ouvriers comme aides, peut carboniser, en deux jours, un tas d'un volume de 50 stères environ. Il faut préalablement préparer les bûches et le matériel pour couvrir la meule (branches, mousse, mottes de gazon peut-être).

En tenant compte du fait que le transport du minerai en provenance de la mine et du bois en provenance de la forêt n'est pas inclus dans ce temps, car le personnel peut l'effectuer en hiver, on devra fixer l'effectif d'un groupe de fours à 10—11 personnes.

Ce calcul permet d'admettre qu'à cette étape une division technique du travail s'est distinctement dessinée, ainsi qu'une certaine spécialisation dans un établissement producteur. Comme le montre une analyse plus précise, le groupe de fours était en marche quelques années, après quoi on changeait de site.

Dans des groupes organisés de fours, on n'a pas pu constater un travail à chaud en plus d'un forgeage des loupes. Donc, les produits étaient en quelque sorte des billettes; on peut le constater d'après un

exemplaire qui a la forme d'un polyèdre, quelque peu régulier. Ceci fait l'objet d'un échange ultérieur.

Division sociale du travail. Nous pouvons à présent continuer nos suppositions: dans la région où la sidérurgie à la mode de Sainte-Croix avait lieu, une division sociale du travail se dessinait. Les mines de fer et surtout celle de Rudki en étaient l'avant-garde. Elles formaient l'objet d'une division du travail technique très avancée: la construction d'un puits d'extraction et des galeries souterraines, l'exploitation minière des couches, le roulage du minerai abattu au fond de la mine et son extraction, la ventilation et l'éclairage nécessaires, peut-être même l'exhaure.

La sidérurgie suivait les mines et possédait une économie en fonction des groupes de fours, une organisation de la production et une division technique du travail.

Il en est de même, mais à un degré restreint, pour les manufactures localisées le long de la rivière Kamienna et, enfin, pour l'exportation de la production au-delà des limites de la région, ou bien l'échange sur place avec des marchands étrangers. Est-il possible d'établir la destination du fer produit aux Monts Sainte-Croix? Qui était protecteur de toute l'économie sociale? Est-ce que cela pouvait se faire spontanément, sans réglage des rapports, en présence d'une division sociale du travail?

J. Piaskowski¹² a effectué des analyses sur 1000 objets de fer environ provenant des pays polonais, un certain nombre d'objets étant originaires des sites voisins de la Kamienna, c'est-à-dire, au voisinage immédiat des groupes de fours producteurs. Grâce à ces études et en appliquant des méthodes de statistique mathématique, il fit une tentative pour définir le "métal Sainte-Croix" provenant de la région en question. Il fournit des informations sur cette méthode et formule ses conclusions dans un rapport séparé.

¹² L'ouvrage essentiel de J. Piaskowski: *Cechy charakterystyczne wyrobów żelaznych produkowanych przez starożytnych hutników w Górach Świętokrzyskich w okresie wpływów rzymskich (I—IV w.n.e)* (Caractéristiques des produits de fer fabriqués par les métallurgistes anciens aux Monts Sainte-Croix, à la période d'influence romaine, I—IV siècles n.è.) ainsi que la discussion sur cet ouvrage furent publiés dans: "Studia z Dziejów Górnictwa i Hutnictwa", VI, 1963.