

éditions
LE FONDS  BELVAL

1, avenue du Rock'n'Roll
L-4361 Esch-sur-Alzette
tél: +352 26 840-1 fax: +352 26 840-300
fb@fonds-belval.lu www.fonds-belval.lu
ISBN 978-2-9199663-5-6

Concept

la restauration des
hauts fourneaux
de Belval

par Jean Lamesch





table des matières

■	Préface	03
■	Biographie de l'auteur	05
■	PARTIE I Réflexions et planification	07-24
1	Les hauts fourneaux et le paradoxe de Thésée	07-13
2	Les principes directeurs du Fonds Belval	13-14
3	Dix arguments historiques	15-19
4	Les trois scénarios en résumé	20-24
■	PARTIE II Le chantier de 1000 jours	25-32
5	Timeline du chantier, vue synoptique	25-32
■	PARTIE III Aspects du chantier	33-84
6	La recherche de la peinture optimale	33-39
7	Echafaudages – bâchages – sécurité	40-54
8	Grenailage, minium, pénibilité	54-55
9	Touches, prétouches, retouches	56-58
10	Masticage, l'opération invisible	58-59
11	Teintes, couleurs et illumination	59-64
12	Restauration des downcomers	64-66
13	Restauration des bleeders	66-69
14	Restauration de la cheminée	69-73
15	Rivetage, boulonnage, soudage	73-76
16	La comparaison avec la Tour Eiffel	76-79
17	L'épisode des faucons pèlerins	79-80
18	Les acteurs du chantier	81-81
19	Epilogue	82-82
■	Annexes	85-103
ANNEXE 1	Les gueulards sans cloche (de Paul Wurth S.A.)	85-90
ANNEXE 2	Journal des essais de peinture	91-96
ANNEXE 3	Un regard sur la corrosion de l'acier	97-103



Préface

Les hauts fourneaux sont l'épicentre de Belval. Leur restauration et leur intégration sont le point de départ de ce nouveau quartier urbain, tourné vers l'avenir, mais pourtant si fortement ancré dans un passé industriel puissant et constitutif de l'histoire du Luxembourg et de la région Sud en particulier. Ces vestiges témoignent d'une période importante de l'histoire du pays, de son émancipation économique et de l'émergence d'une nation portée par le développement de l'industrie sidérurgique.

Un homme en particulier a contribué par son savoir à leur préservation : Jean Lamesch était ingénieur et a passé toute sa carrière auprès de l'Arbed, puis d'Arcelor. Spécialisé dans la protection anti-corrosion, les techniques et les procédés de galvanisation, c'est pour ses compétences professionnelles qu'il a été appelé à intervenir au moment de la restauration et de la mise en valeur de ce patrimoine national, conseillant sur le choix des peintures et vernis qui ont été appliqués sur les Hauts Fourneaux de Belval.

De 2009 à 2014, Jean Lamesch a participé au chantier de Belval et a mené des réflexions sur les différents modes de restauration et leur signification, le problème de l'original et de la copie d'un objet restauré, de l'identité ou encore de la reconstruction. Extrêmement engagé et intervenant avec une grande ferveur, il a documenté, à la demande du Fonds Belval, la démarche initiée et le chantier de restauration des Hauts Fourneaux A et B.

Dépassant même le cadre de sa mission, il fait également part de ses réflexions et analyses personnelles par rapport à ce que représente une telle intervention, un tel monument industriel, son devenir, sa signification. Selon lui : « *La restauration des hauts fourneaux dans le contexte de l'urbanisation de Belval-Ouest est unique en son genre, et ne permet pas de s'inspirer de la façon de faire des autres sites muséaux européens. En effet, dans les pays limitrophes, « les hauts fourneaux-monuments » sont établis soit à la périphérie des centres urbains, soit dans des parcs industriels, jamais en plein centre citadin, au croisement des rues et des passages piétons* ».

Ses études et réflexions s'avèrent instructives et éclairantes, même si certaines n'appartiennent qu'à l'auteur, et s'adressent aussi bien au grand public qu'aux experts de la restauration de monuments historiques et de restauration en matière de patrimoine industriel et culturel. Jean Lamesch explique notamment les différents scénarios de conservation, dont celui retenu, dresse un calendrier du chantier et décrit les différents scénarios de celui-ci : recherche de la peinture optimale, des teintes, des couleurs, de l'illumination, la restauration des *downcomers*, des *bleeders* et présente également les acteurs importants du chantier.

En publiant ce « cahier-concept », le Fonds Belval a souhaité rendre hommage à la mémoire de Jean Lamesch, malheureusement disparu trop tôt en 2020. Le Fonds Belval n'est pas intervenu sur le contenu de ses écrits qui sont transmis aux lecteurs dans leur état originel.

Biographie de l'auteur

JEAN LAMESCH
(1947-2020)

Jean Lamesch est né à Luxembourg. Ancien élève de l'Ecole Polytechnique de Zurich, PhD en chimie-physique, il a passé toute sa carrière dans le groupe Arbed, devenu Arcelor en 2002. Après quelques années passées à Arbed-Recherches, il a continué sa carrière à TradeArbed, puis à l'usine de Dudelange où il a été amené à s'occuper de tôles revêtues. Dans le cadre de ses activités il a publié deux ouvrages : « Galvalange, les vingt premières années » (publication Galvalange, 2001), et par la suite « L'histoire Mondiale de la Galvanisation », (publication Arcelor, 2003). Par ailleurs ses connaissances et ses collections dans des domaines très variés tels que les incunables, les règles de calcul et les mécanismes d'horlogerie, étaient hors du commun.

Après son départ à la retraite et grâce à son expertise dans le revêtement de tôles par galvanisation, par revêtement alu-zinc et par leur mise en peinture, on lui proposa de collaborer à la réfection des Hauts Fourneaux de Belval. Tâche difficile, car il s'agissait de préserver les « géants » aussi véritablement que possible, sans pour autant mettre en danger la population du récent site universitaire à Belval qui circule chaque jour au pied des vénérables monstres.

Pari pris, pari gagné ! Depuis 2014, la vie universitaire s'organise autour des hauts fourneaux, et des restaurants se sont même installés à ses pieds. La vie continue !

PARTIE I Réflexions et planification

1 Les hauts fourneaux et le paradoxe de Thésée.

Au cœur du problème de toute restauration historique, qu'il s'agisse des arts architecturaux ou des arts plastiques, réside le Paradoxe de Thésée.

Selon la légende antique, les citoyens d'Athènes étaient longtemps astreints à un sacrifice humain qu'ils devaient faire chaque année au Minotaure, un être maléfique mi-homme, mi-taureau, qui hantait le labyrinthe de Cnossos en Crète. Un jour, le roi Thésée monta une expédition et s'embarqua pour aller combattre le monstre. Il le repéra, le vainquit, le tua, et revint victorieux vers sa ville en liesse. Plutarque, historien grec du premier siècle de notre ère, rapporte ses péripéties qui s'en suivaient :

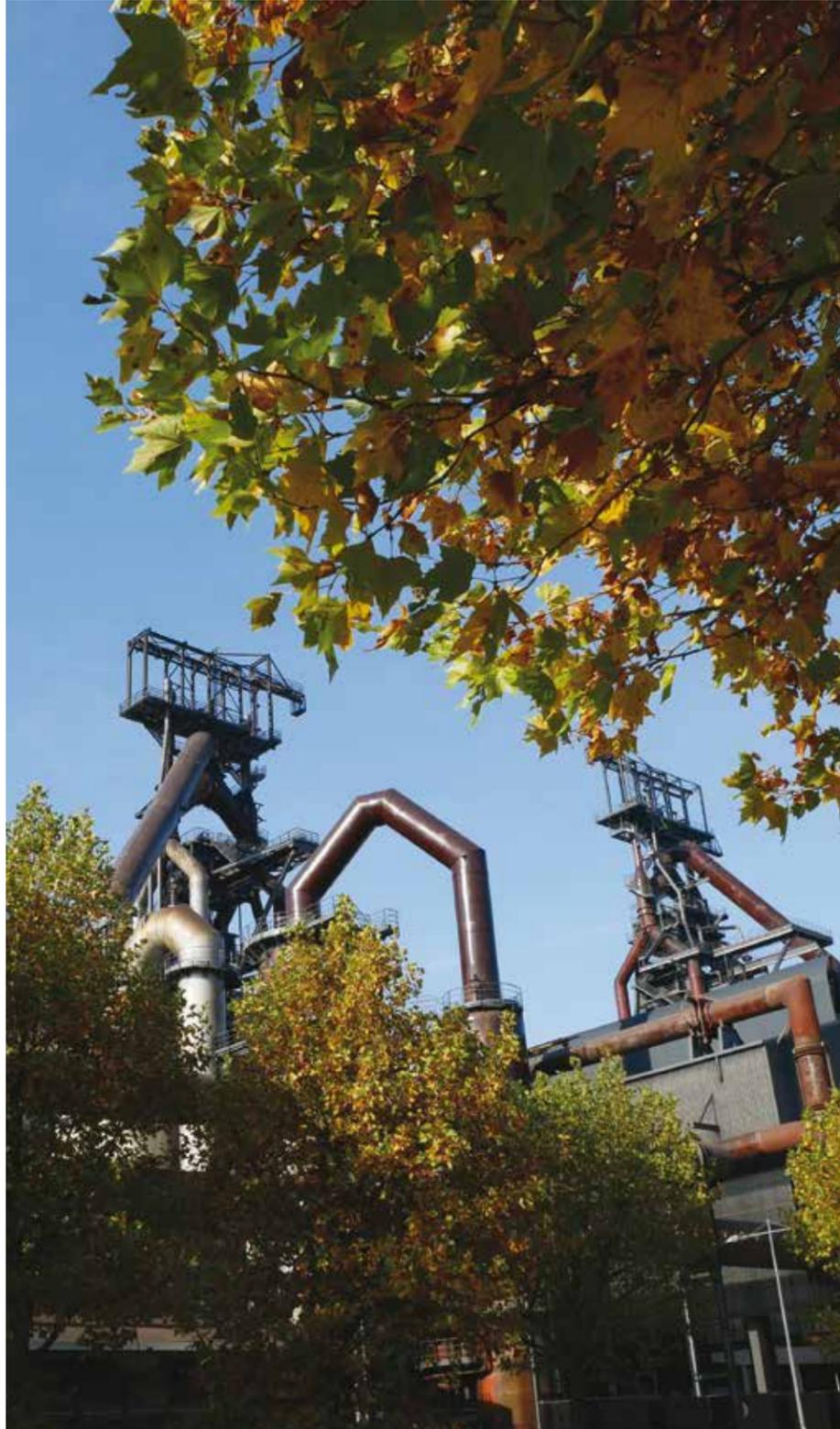


Thésée combat le Minotaure, assisté par Athéna, médaillon d'un kylix d'Aison, v. 430 av. J.-C., Musée archéologique national de Madrid

Le navire dans lequel Thésée et les jeunes guerriers d'Athènes retournèrent de Crète avait 30 rangées de rames, et fut longtemps préservé par les Athéniens, car ils enlevaient les vieilles planches au fur et à mesure qu'elles pourrissaient, et les remplaçaient par des nouvelles, plus résistantes, tant et si bien que ce vaisseau est devenu l'exemple de la question philosophique du changement des choses, les uns maintenant que le navire est resté le même, les autres prétendant que tel n'est pas le cas »
—Plutarque, Theseus

L'altération du vaisseau royal que relate Plutarque, est un processus qu'il est intéressant de suivre pas à pas.

Au début, le navire se trouvait au sec, à quai ou en centre ville, ayant statut de monument-dans-la-cité. On venait le voir, le toucher, le vénérer. Mais hélas, les années passaient et les injures du temps ne l'épargnaient pas. Lorsque la première planche céda, vermoulue, sous l'effet des intempéries et des insectes, les responsables la firent discrètement remplacer. Le navire légèrement restauré continuait sans doute à être considéré comme le vrai et unique vaisseau du roi. Mais peu après, il fallut remplacer une seconde planche, puis une troisième, ensuite une pièce de grément. Les sophistes de la ville, perspicaces et sarcastiques, criaient haut et fort que le monument n'était plus le fier bateau royal qui avait jadis sillonné la mer Egée et bravé les chevaux de Neptune, mais une vulgaire copie. Le bon peuple d'Athènes ne se rangeait pas à cet avis, et continuait à cultiver le souvenir du courageux roi, sauveur de la cité. A un moment donné, le navire n'était plus qu'à moitié original. Cette étape de cinquante pour cent a-t-elle fait basculer l'original à la copie, ou bien son identité était-elle déjà perdue auparavant?



Et le pourcentage était-il un simple point de vue de comptable, ou mettait-il le doigt sur une question plus profonde? Personne ne savait donner de réponse. Mais les dégradations ne discontinuaient pas, et un jour, la mort dans l'âme, les restaurateurs se virent obligés de remplacer la toute dernière pièce originale par une réplique, et cela sous le ricanement des sophistes, qui avaient beau jeu de crier à l'imposture. Certains des citoyens, du moins ceux qui avaient un penchant philosophique, restaient convaincus que l'identité était conservée tant par la forme du navire que par la continuité de la vénération et que leur monument gardait donc parfaitement son identité et son sens, d'autres rejetaient cet argument en maintenant que l'identité est tributaire de la seule matière, et que pastiche égale pastiche.

Puis un citoyen posa la question autrement : l'assemblage de bois qu'ils vénéraient était-il le véritable bateau, ou au contraire, ne représentait-t-il que le monument de ce bateau ? Ils en restaient tous perturbés.

Le problème de l'identité des choses était ainsi posé, pour ne plus jamais disparaître, et il allait occuper philosophes et logiciens jusqu'à aujourd'hui.

Au cours des siècles suivants, il y eut de multiples tentatives pour résoudre le problème de l'identité et de l'altérité, du « même » et de l'« autre », mais bornons-nous ici à rappeler les vues d'Aristote, qui en dépit de leur ancienneté ont le mérite de bien faire la part des choses, et de clairement inventorier les divers arguments.

Suivant cet illustre penseur, il existe quatre causes ou raisons profondes qui garantissent l'identité d'une chose, et la persistance de cette identité à travers le temps, quatre causes utiles pour résoudre la difficulté posée par le bateau de Thésée :

Un objet, ou plutôt son existence, s'explique d'abord par sa « cause formelle », ou, plus simplement, par sa « forme ». C'est la forme qui lui donne l'existence, forme étant entendue dans le sens de concept. Suivant ce principe, si le bateau de Thésée a préservé sa forme, il a préservé son identité.

Une seconde explication invoque la « cause matérielle ». Dans ce sens, l'identité est liée à la matière et disparaît avec elle. Ce point de vue est très largement partagé par les restaurateurs contemporains, et par les offices de conservation du patrimoine. Ils l'ont érigé en principe universel par les conventions de Venise et autres. Aristote montre cependant que ce n'est là qu'un principe parmi plusieurs autres, tout aussi défendables et que la nature d'un objet peut être suffisamment déterminée par sa cause formelle, alors que la cause matérielle ne peut être que contingente et accidentelle. Le bateau conservé de Thésée, serait donc dans ce sens le bateau, indépendamment de ses malheurs de pourriture, car sa cause formelle s'est trouvée sauvegardée.

La « cause finale », la troisième, explique l'objet par l'intention de ses concepteurs. Le bateau - que ce soit sous sa forme chronologiquement originale, ou sous sa forme anachroniquement restaurée, - a un seul et même but : signifier mythiquement le voyage de Thésée, et symboliser politiquement les libertés civiques athéniennes.

Quatrième élément du raisonnement ontologique : la « cause efficiente ». Celle-ci explique comment, par le travail des artisans ou des poètes, un objet est né, ou un poème est écrit. Les ouvriers du chantier naval du Pirée, embauchés pour restaurer le monument, ont utilisé les méthodes, outils et matériaux qu'ils ont jadis mis en œuvre pour la construction du bateau, et en ce sens, objet original et objet restauré se confondent, car nés de la même cause efficiente.



Gëlle Fra à Luxembourg

Le problème des Athéniens reste d'actualité : le plus prestigieux des navires-musée anglais, - le plus restauré aussi - le fier Victory, vaisseau amiral de Nelson, n'a plus que cinq pour cent de pièces originales, qui ont vu en octobre 1805 la bataille de Trafalgar. Il en va de même du Cutty Sark, le plus rapide des voiliers de la route des Indes. A la Havane, les fameuses voitures des années 1960 n'ont des véritables old-timers que l'aspect extérieur, la majorité des pièces originales ayant été depuis longtemps remplacées. Et plus près de nous, les monuments luxembourgeois qui relèvent de ce paradoxe ne sont pas rares : notre « Gëlle Fra », restaurée après la chute de son socle, au cou cassé remis à un angle nouveau, regarde maintenant pudiquement vers le bas plutôt que de fixer comme jadis les horizons lointains. Dorée à neuf, elle resplendit comme jamais auparavant, bien différente de celle qui sortit en 1923 de la fonderie. A-t-elle perdu pour autant son identité ? Il n'y a que des esprits grincheux qui

pourraient le prétendre, même si sa restauration a violé la précitée Charte de Venise, et qu'on pourrait donc l'associer au bateau de Thésée, figurativement parlant, comme figure de proue. Et que dire de la sur-restauration du château de Vianden, sans aucun doute le plus bel édifice médiéval du 21^e siècle, agrémenté de climatisation et de chauffage central ?

Mais revenons au bateau de Thésée. Bon nombre de siècles après Plutarque, le philosophe anglais Hobbes a élargi l'anecdote grecque d'une façon intéressante. Il s'est demandé ce qui serait arrivé si un fieffé Athénien avait collectionné les pièces de bois vermoulues, les avait remises en état, et avait ainsi été en mesure de reconstruire le bateau à l'originale. Les Athé-

niens auraient alors découvert avec étonnement qu'ils étaient propriétaires de deux vaisseaux se réclamant de la même expédition crétoise, celui vénéré sur la place publique, et l'autre, refait de pièces jetées, mais originales. Que Thésée ne fût revenu que sur un seul bateau, tout le monde en convenait, mais maintenant on sentait qu'il fallait se décider entre deux embarcations semblables, très semblables, au point de paraître identiques. Mais qui est quoi, lequel est l'original ou l'original bis, la copie ou le fac-simile, le remodelé ou le reconstruit, le vrai ou le faux - ou l'entre-les-deux ? Le paradoxe de Thésée était parfait.

Supposons que l'instance athénienne supérieure, l'Aréopage, excédé par la question, ait prié les dieux de faire revenir Thésée, juste un moment, pour trancher la question. Et que la prière ait été exaucée. On peut ainsi imaginer Thésée se retrouver, passablement mal à l'aise, devant deux navires, et son cœur balancer entre l'un et l'autre. Le navire sur la place publique, si pieusement conservé, l'aurait ému profondément. Il aurait été attendri par la continuité dans le temps et l'espace, par cette ardeur de ses citoyens à le préserver au même endroit et à travers ces décennies et ces siècles. L'autre, refait en pièces originales l'aurait attiré d'une autre façon, car ses pieds avaient jadis foulé ces planches et ses mains s'étaient agrippées à ce bastingage. Mais sur ce prétendu original, Thésée aurait fini par remarquer toute la pourriture du bois, savamment oblitérée et colmatée, une pourriture qui n'existait pas sur le bateau qui l'avait mené en Crète. Il se serait souvenu aussi que lors du retour vers Athènes, le bateau tenait moins bien le cap qu'à l'aller, car les marins avaient rafistolé chemin faisant voilures et gréements. Le bateau avait donc continuellement changé, même lors du court espace de temps qu'il était sous son commandement. Que dire maintenant à l'Aréopage ? Il hésiterait, son esprit s'embrouillerait. Le conflit était patent : les deux pouvaient passer pour originaux, mais suivant des critères et points de vue différents et mutuellement exclusifs.

Pour assister Thésée dans son difficile et périlleux exercice de logique, l'Aréopage aurait également prié les dieux de ressusciter, en dépit d'un anachronisme patent, le plus brillant, le plus décapant, le plus radical des logiciens, à savoir Ludwig Wittgenstein. Tant qu'à faire revenir l'un on peut faire revenir l'autre, se seraient dit les dieux de l'Olympe, pour une fois éléments, et voilà le logicien du 20^e siècle à côté du roi antique, face aux deux navires. Ludwig aurait flairé de suite le piège. Il se serait tourné vers Thésée, et lui aurait soufflé à l'oreille un axiome de son 'Tractatus', aussi cinglant que pertinent : « Wovon man nicht reden kann, darüber soll man schweigen! » « Quand on ne peut pas parler, on doit se taire! » (respectivement l'équivalent en grec ancien).

On trouve une partie de cette thèse dans le roman « The Last Chance to See », par Douglas Adams, qui éclaire d'une façon piquante le problème de l'identité de monuments, et ce à propos de la restauration du Temple d'Or de Kyoto. Voici l'extrait, traduit en français :

Je me souviens avoir visité le Temple d'Or à Kyoto, et j'avais été surpris de voir combien son bois avait bien résisté durant tous ces siècles, vu qu'il date du quatorzième siècle de notre ère. Mon guide japonais me répondit que le Temple n'avait pas résisté du tout, puis qu'il avait été totalement détruit par des incendies, encore au vingtième siècle. Ce qui me fit poser les questions suivantes :

« Donc ce n'est pas là le bâtiment original ? »

« Mais si, bien sûr » répliqua le guide, quelque peu surpris par ma question.

« Mais il a brûlé jusqu'aux fondations ? »

« Oui »

« Deux fois »

« Oh, plus souvent que cela »

« Et reconstruit ? »

« Evidemment, car c'est un bâtiment important et historique »

« Avec de nouveaux matériaux ? »

« Mais oui, forcément, puisqu'il a été détruit de fond en comble »

« Alors comment pouvez-vous dire que c'est le même bâtiment ? »

« Cela a toujours été le même bâtiment. »

Je devais admettre que le point de vue de mon guide était parfaitement logique, même s'il est parti d'une hypothèse quelque peu inattendue. L'idée du bâtiment, l'intention de son design, et le concept sont immuables et constituent la véritable essence du Temple d'Or. Ce qui survit, c'est l'intention des constructeurs d'antan. Le bois qui a été utilisé, pourri ou brûlé, est remplacé si nécessaire. A trop se concentrer sur les matériaux originaux, qui ne sont que souvenirs sentimentaux du passé, on risque de ne pas voir le bâtiment vivant.

Le Haut Fourneau C de Belval, vendu en 1995 à la société chinoise Kunming Iron & Steel Company (Kisco) a connu un tel sort. Une équipe de plusieurs centaines d'ouvriers et techniciens de l'Empire du Milieu ont mis le grand engin en pièces détachées qui ont été emballées et transportées dans la ville de Kunming. Le C a été remonté, ressuscité en quelque sorte, dans le Yunnan. C'est le même haut fourneau, en même temps qu'il en est devenu un autre, par la force des choses. Le paradoxe de Thésée est universel. Mais bien sûr un démontage-remontage, comme celui du Haut Fourneau C, est une altération plus profonde qu'une restauration, telle que la subiront les Hauts Fourneaux A et B.

L'identité de ces derniers, tout comme celle du bateau de Thésée n'est pas clairement définie. Jamais pareils à eux-mêmes, ils ont été usés et endommagés tout au long de leur vie active, réparés, adaptés, modifiés, augmentés. Leur maçonnerie s'est érodé au fil des charges de minerai, comme la rivière d'Héraclite a coulé et changé tout en restant semblable à elle-même. N'empêche que les deux hauts fourneaux ont survécu bien plus complets que le bateau de Thésée, le Victory, ou le Temple d'Or. Les restaurations ont été plus bien plus douces, l'ingérence des restaurateurs plus légère, mais il n'empêche que leur remise en état a rappelé les questions de fond :



Quels hauts fourneaux restaurer, ceux de leur premier jour de fonctionnement, de la première année de service, du moment de l'arrêt, amputés de leur amont et de leur aval, ou encore ceux après une décennie de corrosion et de friche ? Maintenant que leur restauration est achevée, ils sont aussi peu aptes à produire de la fonte que le bateau de Thésée à naviguer sur les mers, mais comme lui, mutés en monuments, ils sont lourdement chargés de sens et d'histoire, et c'est là l'essentiel.

2 Les principes directeurs du Fonds Belval

La restauration des hauts fourneaux dans le contexte de l'urbanisation de Belval-Ouest est unique en son genre, et ne permet pas de s'inspirer des façons de faire des autres sites muséaux européens. En effet, dans les pays limitrophes, les « hauts fourneaux-monuments » sont établis soit à la périphérie des centres urbains, soit dans des parcs industriels, jamais en plein centre citadin, au croisement des rues et des passages piétons. La perspective de devoir entourer à un moment donné un haut fourneau d'un cordon sanitaire suite à une chute de pièces métalliques, était proprement impensable. Il s'en suivait la nécessité de mettre en place des solutions propres, adaptées à la situation particulière.

De ce constat ont découlé les décisions suivantes :

Le grand principe était le suivant : la conservation des hauts fourneaux sera d'abord urbaine, avant d'être historique (donc avant tout « stadt-tauglich ») et elle devra privilégier les critères de sécurité et de durabilité.

La restauration d'anciens complexes industriels inspire la plupart du temps des principes du 'Comité International pour la Conservation du patrimoine industriel' (TICCIH) dans la Charte de Nizhny Tagil, qui prône la conservation de tous les éléments ayant trait au site. La situation particulière de Belval, la proximité des édifices avoisinants comme la bibliothèque de l'université, l'emplacement des hauts fourneaux à l'entrecroisement des axes de communication, a fait que la conservation a dû par nécessité s'affranchir de certaines lignes directrices prônées par le TICCIH. En d'autres termes, le Fonds Belval, amené à procéder à un arbitrage entre une restauration historique d'un côté, et une restauration citadine, urbaine de l'autre, a opté pour la primauté de la seconde sur la première.

Mais l'aspect historique sera préservé. La première décision se trouve complétée par une seconde : là, où les critères de sécurité et de longévité le permettent, le caractère historique des surfaces sera intégralement conservé. Une troisième décision concerne les aspects environnementaux : la mise en peinture sera la plus écologique possible.

Un quatrième principe s'ajoute et a trait aux aspects technologiques et créatifs du projet : les fournisseurs de matières seront des firmes réputées, disposant d'un large éventail de produits, tant au moment de la restauration que dans les années qui suivent, qui seront à même de déléguer des représen-

tants expérimentés, innovants et créateurs, et qui disposeront des moyens de recherche adéquats pour répondre aux exigences de ce chantier unique. Des critères similaires concernent les 'applicateurs', c'est à dire les sociétés spécialisées dans la mise en peintures à grande échelle. Notons que le complexe des hauts fourneaux atteint les 100 000 mètres carrés.

Cinquième décision : l'absence de références rend obligatoire une campagne d'essais préliminaires, conçus pour arriver à un choix final correct. Heureusement, les essais n'étaient pas sous une forte contrainte de temps, car la dernière phase des travaux de déblayements a été mise à profit pour exécuter dans la sérénité les essais destinés à fournir des renseignements précieux sur la préparation de surface, le choix des systèmes de peintures les mieux appropriés et les meilleures méthodes pour les appliquer. L'esthétique n'était pas en reste. Conseillé par un bureau d'architectes spécialisés en éclairage, le Fonds Belval a opté pour des essais d'illumination en grandeur nature et des les teintes adaptées tant à l'ancien milieu sidérurgique qu'au cadre urbain moderne.

C'est pour ce vaste programme qu'une équipe d'experts a été réunie en juin 2006, composée de représentants du Fonds Belval et de consultants externes, tous avec des spécialités ayant trait à l'acier et ses propriétés mécaniques, à son assemblage, à son comportement à la corrosion, de même qu'à la physico-chimie des traitements de surface et des revêtements de protection. Cette équipe avait pour mission d'élaborer la stratégie de la mise en place des essais, d'en effectuer le suivi, d'en tirer les conclusions pour la conservation définitive, d'encadrer et de surveiller ensuite les travaux généraux, du début jusqu'au résultat final, et d'en documenter le progrès au jour le jour. C'est de cet effort documentaire que le présent livre est né.

Quelques aspects normatifs et politiques

Les chartes de restauration, celle de Venise et autres, se cantonnent, par nature, dans les technicités mais sont muettes sur les questions normatives : pourquoi restaurer et ne pas démolir, pourquoi ne pas laisser à l'abandon, pourquoi restaurer le tout plutôt qu'une partie. Ces aspects philosophiques sont autant de défis pour la communauté concernée. Celle-ci peut y voir une démarche remplie de sens, - ou non-, et être prête - ou non- , à engager les montants nécessaires.

Dans le cas des Hauts Fourneaux de Belval, l'initiative de la restauration de ce qui est maintenant regardé comme patrimoine national, a été prise par les dirigeants politiques, secondés par un nombre d'associations citoyennes, et on peut dire, avec le recul de quelques années, que l'initiative a rencontré un consensus très large auprès de la population, au point qu'il est aussi difficile de nos jours d'imaginer le campus de l'Université du Luxembourg sans les hauts fourneaux que de se représenter le Champ de Mars sans la Tour Eiffel.

3 Dix arguments historiques

Pour commencer, voici quelques réflexions intéressantes, tirées du discours de Jean-Claude Juncker à l'occasion du centième anniversaire de la sidérurgie, le 15 septembre 2011 :

- *La sidérurgie et le pays ont vécu l'histoire ensemble.*
- *Par la sidérurgie, le Luxembourg a échappé au destin habituel des petits pays.*
- *L'anomalie de la sidérurgie dans un si petit pays.*
- *La sidérurgie est la quatrième couleur de notre drapeau.*
- *La conservation des hauts fourneaux est plus qu'une simple repeinture.*

Ces énoncés, presque des adages, montrent à quel point le signifié qui s'attache aux hauts fourneaux luxembourgeois dépasse leur signifiant comme simples appareils de production de fonte. Il renvoie directement aux fondements historiques du tissu politique, économique et social du pays. Sans ces renvois, leur conservation n'aurait pas trop de sens. Il est dès lors intéressant d'examiner, à l'aide de dix arguments, les aspects qui lient intimement les hauts fourneaux à l'histoire nationale moderne.

1. A partir du milieu du 19^e siècle, l'essor de la sidérurgie a permis la première ouverture du Luxembourg sur **le monde du commerce international**. Par le chemin de fer et la sidérurgie moderne qui s'est développée dans son sillage, le pays a pu sortir durablement de son isolement séculaire. Au tournant du 18^e au 19^e siècle, il n'avait pas pris part, comme ses voisins européens, aux premières phases de la Révolution industrielle, mais ce développement sidérurgique, tardif il est vrai, lui a permis de combler progressivement le retard. Au cours de la seconde moitié du 19^e siècle, la production de fonte à partir de coke a dépassé celle au charbon de bois d'un facteur 10, puis 50 puis 100, pour atteindre en 1900 un million de tonnes, orientées presque entièrement vers le commerce extérieur.
2. Les produits des hauts fourneaux ont contribué au **financement de l'indépendance** du pays au 19^e siècle. Sans les minerais, qui ont constitué sa principale richesse naturelle, et sans les concessions minières qui en ont résulté, sans les flux monétaires ainsi générés et qui ont alimenté directement et indirectement les caisses de l'État, le pays aurait certainement eu bien plus de mal à subvenir aux coûts de son indépendance et au financement de son infrastructure. Ces initiatives n'étaient pas possibles sans les apports de l'étranger. La sidérurgie luxembourgeoise pratiquait très tôt la mondialisation, comme Monsieur Jourdain la prose. Ainsi, la mise en valeur des sites sidérurgiques luxembourgeois a été fortement redevable à deux apports étrangers significatifs, des investis-

sements étrangers d'un côté, et les transferts de technologie de l'autre (tels par exemple le brevet Thomas de 1879, anglais, et celui, américain, des poutrelles Grey de 1905).

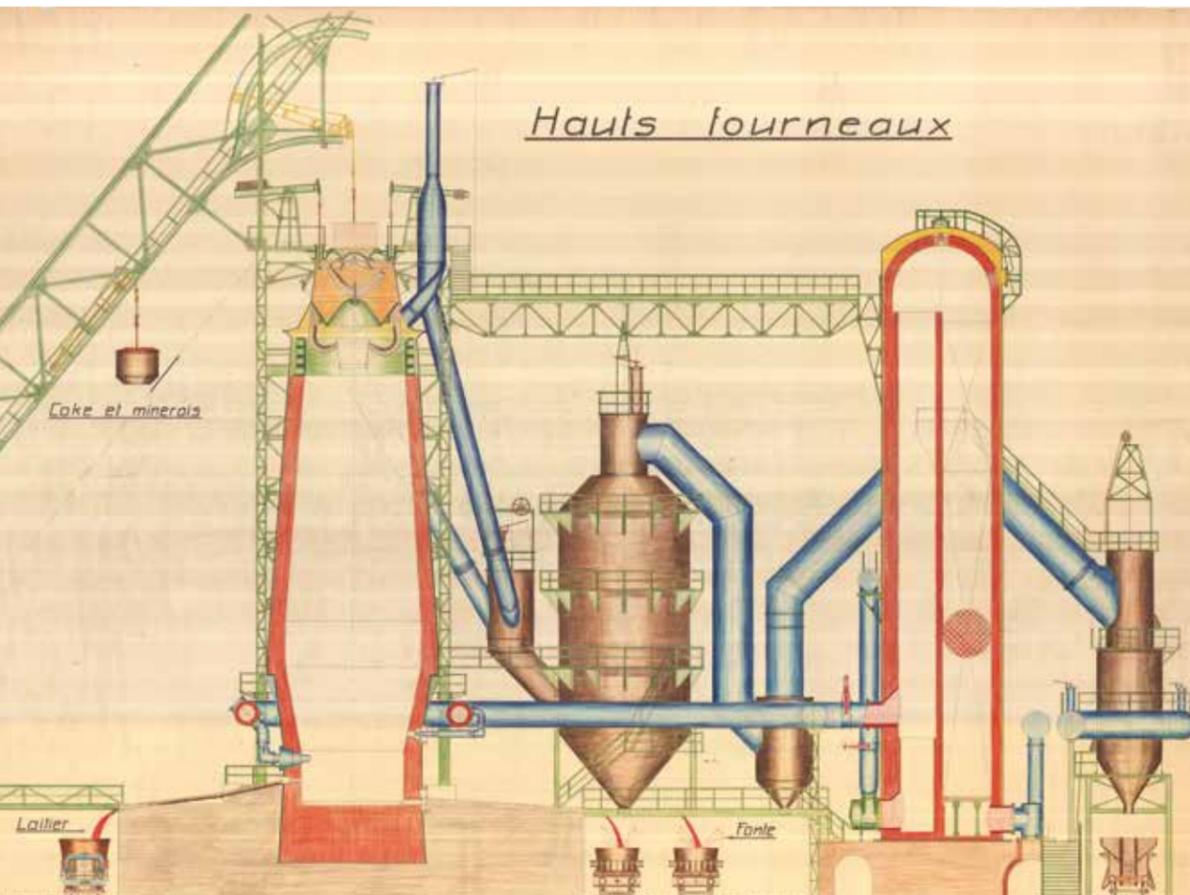
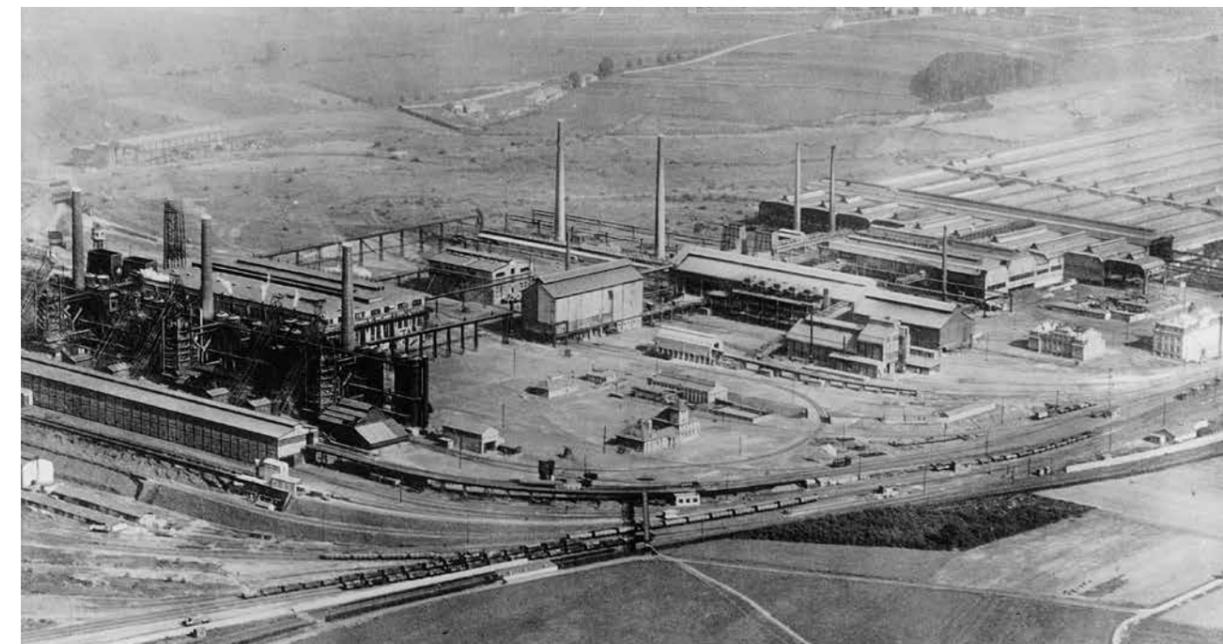


Illustration de R. Ferh

- Plus tard, lors de la création de la **Communauté Européenne du Charbon et de l'Acier**, la CECA, ancêtre de l'Union Européenne, le fait que celle-ci fut assise sur le charbon et l'acier, et non pas sur un 'pool vert' agricole par exemple (ou encore sur une politique d'énergie communautaire, comme cela avait été envisagé à un moment donné, au tout début des années 1950, critères qui auraient laissé notre pays sur la paille), le fait donc que l'acier fut l'une des deux mamelles (merci Sully) de la CECA, a permis au Luxembourg de se joindre au concert des cinq autres grandes nations comme membre fondateur et partenaire respectable qui, grâce à sa sidérurgie - et son extraordinaire densité de hauts fourneaux - a obtenu voix au chapitre.

- La fonte de haut fourneau - et non pas l'acier** - a été le produit phare de la première industrialisation du pays, devançant de loin l'acier et les produits laminés ou forgés. Au Luxembourg, plus que dans les pays avoisinants, la sidérurgie produisait de la fonte d'abord, de l'acier ensuite. Jusqu'au milieu du 19^e siècle, affiner et laminier l'acier s'était toujours avéré plus difficile que couler de la fonte, un art plutôt qu'une technique. Ce n'est qu'avec l'invention du procédé d'affinage de Bessemer vers 1855 - et le procédé de Thomas une vingtaine d'années plus tard pour la fonte phosphoreuse - que les choses ont changé, et que la production d'acier s'est développée. Mais il a fallu attendre la fin de la première guerre mondiale pour voir le tonnage d'acier atteindre l'ordre de grandeur de celui de la fonte.
- L'emplacement des Hauts Fourneaux survivants de Belval est **un lieu d'histoire**. Ils se dressent en effet sur le même emplacement, sur le même axe nord-sud, que leurs six prédécesseurs lointains, érigés en 1912 lors de l'implantation de la Adolf-Emil Hütte, la plus grande usine intégrée de l'époque sur notre territoire. D'un côté ce fut là la première mise en valeur du site de Belval. De l'autre, c'était l'acquisition de cette Hütte dans l'après-première-guerre-mondiale qui a permis au jeune Groupe Arbed d'atteindre une envergure véritablement internationale. Les deux engins commémorent donc de ce point de vue un siècle d'histoire industrielle.



Vue aérienne de l'usine de Belval dans les années 1920.

6. Ils représentent les plus imposantes réalisations de **l'ingénierie luxembourgeoise**, non seulement en étendue et en volume, mais également en savoir-faire technologique (ou 'savoir-fer' selon un bon mot). Ce sont les ingénieurs de Paul Wurth qui ont conçu et produit les deux fours, en partie dans leurs propres ateliers, en partie en sous-traitance. L'innovation la plus marquée a été certainement le 'gueulard sans cloche', la fermeture supérieure du haut fourneau qui permet un chargement contrôlé et dirigé de milliers de tonnes de coke et d'aggloméré, sans que les conditions à l'intérieur du four en pâtissent. Le gueulard sans cloche a constitué à cette époque la pierre angulaire dans la stratégie qui a fait de Paul Wurth une société d'ingénierie de renommée internationale.
7. Les hauts fourneaux rappellent également les vastes et multiples **flux migratoires** déclenchés par l'implantation de la sidérurgie, flux qui se sont mis en mouvement au tournant du 19^e au 20^e siècle et qui ne se sont taris pour la sidérurgie qu'avec la fin des Trente Glorieuses. Ces migrations concernent autant les populations ouvrières étrangères - on n'a qu'à penser à l'immigration des Allemands à la fin du 19^e, relayée par celle des Italiens et d'autres nations un peu plus tard - que la population nationale.
8. Comme dans aucun autre pays, il a existé un lien direct entre l'essor de **la sidérurgie et celui de l'agriculture**. L'agriculture d'antan se trouvait en permanence dans un état précaire ; le moindre épisode climatique défavorable mettait en péril la subsistance des habitants. Les raisons en sont multiples, et une des principales est géologique : la plupart de nos sols labourables manquent de phosphates naturels. Cette question fut élucidée pour la première fois dans les années 1840 par le naturaliste allemand Justus Liebig, qui a identifié les trois éléments essentiels dont tout bonne terre arable doit être pourvue : l'azote, le potassium et le phosphate. Et il a formulé sa célèbre Loi des Minima, d'après laquelle la croissance végétale est invariablement déterminée par l'élément minéral dont la teneur est la plus faible. Au Luxembourg, surtout dans le Nord du pays, l'élément déficitaire a été le phosphate. Paradoxalement, la minette était abondamment pourvue d'oxydes de phosphore, mais dans un état insoluble, donc inassimilables par les plantes. Apparut alors le génial inventeur anglais Sidney Thomas, imbu des leçons de Liebig et de Malthus, et il mit au point un procédé capable d'éliminer le phosphore de la fonte, et - ô miracle - de le convertir simultanément en phosphates solubles à l'eau, appelés derechef scories Thomas. De cette façon, avec les scories Thomas, et leur plein de phosphates solubles et assimilables par les racines, l'agriculture luxembourgeoise disposait enfin d'un véritable engrais, un engrais miraculeux, bon marché - car subventionné par fiat du gouvernement - en provenance de la sidérurgie. Il se produisit un véritable renouveau de nos cultures, au point qu'on peut affirmer, en exagérant à peine, que l'agriculture luxembourgeoise était la 'fille aînée' de la sidérurgie. Bien sûr, à partir des Trente Glorieuses, avec la disponibilité croissante de pétrole et de gaz naturel, s'est développée l'industrie chimique, qui a substitué aux engrais sidérurgiques les engrais synthétiques, encore moins chers, et le lien entre champs et aciéries a fini par se briser.
9. Comme la scorie Thomas est le sous-produit de l'aciérie, ainsi le laitier (Schlacke) est celui du haut fourneau. Les minerais de fer, dans leurs gisements géologiques (comme la minette par exemple), sont toujours accompagnés de «gangue», c'est-à-dire de matières minérales silicatées. Ces matières, peu désirables, car diminuant le rendement de la fonte, entrent en fusion dans le haut fourneau, mais, ayant une densité moindre que la fonte, sortent par un trou de coulée séparé. La quantité de laitier produit à partir de la minette luxembourgeoise a été très importante, puisque sa masse a dépassé celle de la fonte. Dans l'aval du haut fourneau, le laitier subit plusieurs transformations thermiques et mécaniques, pour donner lieu à des produits importants utilisés dans **l'industrie du bâtiment** (ciment type Portland) **et de la voirie** (soubassement des routes et chaussées). Ici également, les apports de la sidérurgie à l'économie nationale ont été considérables, sur plus d'un siècle.
10. Il faut rappeler, pour finir, qu'à l'ère du numérique, les hauts-fourneaux et leurs variantes ne sont pas des engins d'un autre âge, appelés à bientôt disparaître, dinosaures d'un autre temps. Le recyclage intégral n'existant pas, on aura toujours besoin, dans le cadre d'une population mondiale croissante, des **instruments pour extraire de nouvelles quantités de fer** des gisements géologiques.

4 Les 3 scénarios en résumé (2003-2005)

Le 15 octobre 2003 la Chambre des Députés a donné son accord à une proposition de loi introduite par le gouvernement portant sur les travaux de stabilisation et de sécurisation des Hauts Fourneaux de Belval. A ce moment, ceux-ci avaient commencé à montrer de sérieux signes de corrosion et de décrépitude. Cette première loi fut le préalable à la mise en chantier du projet de conservation. Mais faute d'informations sur une aussi vaste entreprise, il était impossible à ce moment d'en déterminer l'ampleur et le coût.

Le Fonds Belval fut chargé d'établir une étude concernant ces questions, en associant les expertises nécessaires. Il fallut tout d'abord quantifier et qualifier les installations, c'est-à-dire établir un état des lieux par le détail. Un groupe d'ingénieurs ont alors redessiné en trois dimensions les deux hauts fourneaux avec leurs installations annexes.

Cet état des lieux se limita au périmètre des hauts fourneaux : les voiries situées au sud et à l'est, au nord la banque DEXIA et à l'ouest la Place de l'Académie, intégrées depuis dans le domaine public du nouveau quartier urbain. Cette aire de 3 hectares comporte les hauts fourneaux, la Möllerei (les anciens bunkers à coke et à minerai), le bâtiment dit de la Masse Noire, le Highway (disparu depuis) et le bâtiment des contremaîtres (converti en pépinière de start-ups).

4.000 plans provenant des archives de Belval ont constitué la base de cette étude. Ces plans ont été classifiés et catalogués pour créer une base graphique utilisable pour la suite des études de plus en plus détaillées. Les structures primaires et secondaires, tout comme les équipements sidérurgiques, ont été redessinés en trois dimensions. La concordance du modèle avec la réalité a ensuite été vérifiée par des mesures sur place. Cette documentation graphique couplée à un programme d'exploitation approprié a permis de créer une base de données pour les travaux subséquents. Tout au long du chantier, elle n'a cessé de prouver sa richesse.

La seconde partie de l'étude concernait un glossaire technique détaillé comportant une description technologique, une description fonctionnelle, les caractéristiques physiques, dimensions, poids, volumes, etc. de chaque pièce, ainsi que les modifications apportées à l'installation depuis son origine. Cette documentation a été complétée par un reportage photographique exhaustif, une base de données qui a permis d'évaluer avec précision les quantités des aciers classés par profilés et de qualifier l'état des constructions.

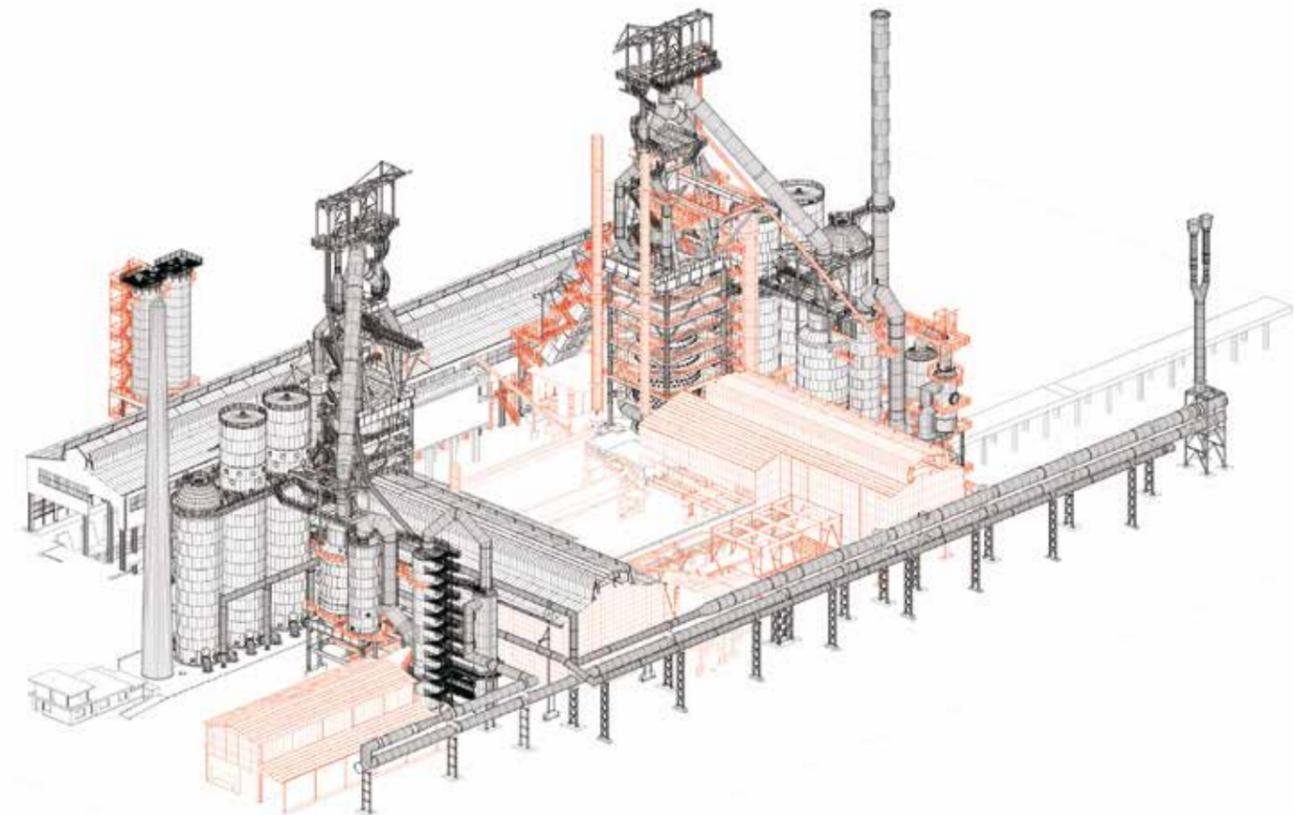
La troisième partie de l'étude a concerné différents scénarios de conservation. Le détail de cette étude fait l'objet d'une publication à part du Fonds Belval et n'est résumée ici que pour mémoire.

Trois scénarios ont été élaborés :

Le premier prévoit une approche strictement **muséale** par la conservation quasi intégrale des installations industrielles.

Le second scénario table sur une conservation minimale se limitant au maintien de la seule silhouette des hauts fourneaux comme «**Landmark**».

Le troisième scénario est **un compromis** dans le sens qu'il prévoit de conserver le Haut Fourneau A dans ses structures principales - et nécessaires pour documenter d'une manière suffisamment précise le processus de fonte - et d'un autre côté il propose le démantèlement du Haut Fourneau B pour n'en laisser qu'une silhouette.



Axonométrie du scénario 3

Ces trois concepts de conservation correspondant à la demande de la commission des Travaux Publics, ont été développés chacun en toute indépendance les uns des autres, par des groupes de travail autonomes re-

groupant des historiens, des ingénieurs, des architectes et des conseillers techniques du monde de l'industrie et des Sites et Monuments.

Les trois scénarios ainsi développés ont été soumis à une évaluation financière. Le Fonds Belval s'est associé aux compétences de la société Paul Wurth, le seul constructeur dans le domaine de la sidérurgie au Luxembourg.

Les diverses interventions une fois définies, le coût des travaux a pu être estimé en appliquant les mêmes paramètres de calcul pour chacune des interventions. Parallèlement, les frais de maintenance des trois scénarios ont été évalués pour une période de 30 ans, une échéance raisonnable pour un tel objet.

Le 18 février 2005, le gouvernement a discuté les trois scénarios concernant la conservation des hauts fourneaux de Belval et a retenu la troisième proposition, celle qui s'est fixée pour objectif de documenter le processus

de fonte sur l'un des hauts fourneaux et de ne conserver que les éléments de silhouette du second. Cette décision s'est inscrite dans la démarche entamée le 17 décembre 1996 par l'adoption à l'unanimité par la Chambre des Députés d'une motion tendant à conserver l'un des deux derniers hauts fourneaux du Grand-Duché de Luxembourg. Ce fut le départ d'un projet qui, plus de dix ans plus tard, est entré dans sa phase de réalisation.

Pour terminer, on peut rappeler une question qui a été le sujet de maintes discussions lors de l'élaboration du concept général, à savoir s'il fallait conserver un seul haut fourneau ou les deux.

Quand bien même une réponse ne se laisse pas dériver par la seule logique, il est cependant possible d'avancer quelques arguments convainquants en faveur d'un duo. Initialement, il était prévu de construire, entre les deux, un Centre National de la Culture Industrielle. Ce centre aurait été flanqué de part et d'autre d'un haut fourneau, constituant ainsi une véritable coulisse, une mise en scène symétrique. L'esprit humain aime la symétrie, ou l'asymétrie bien conçue, mais non pas la dissymétrie. Les hauts fourneaux sont globalement symétriques et localement peu asymétriques. L'esprit peut donc y trouver son compte. Ce centre n'a jamais vu le jour, victime de la crise financière de 2008. Cela a détruit l'argument de la mise en scène pour un moment, mais quelques années plus tard, l'endroit fut occupé par un autre bâtiment, à savoir le Luxembourg Institute for Science and Technology (LIST) - et la symétrie se trouvait à nouveau justifiée. Pour résumer, la symétrie est agréable, et elle est surtout plaisante lorsqu'elle est n'est pas parfaite, - comme un beau visage n'est jamais géométriquement symétrique, et que par ailleurs, le tout fait toujours plus que la somme de ses parties.



PARTIE II Le chantier de 1000 jours

5 Timeline du chantier – vue synoptique

Il faut d'emblée se rendre compte qu'un chantier de restauration de la taille et de la complexité de celui des hauts fourneaux et de ses annexes se décline toujours suivant trois dimensions :

La dimension verticale

Les objets suivent la loi de la gravité et tombent, la peinture coule, les étincelles de soudage s'échappent en arcs inclinés, les grenailles ruissellent, les échafaudages se construisent de bas en haut, plus souvent que de haut en bas, mais se démontent de haut en bas. En d'autres mots, la prise en compte de la dimension verticale, sur une hauteur de 80m, est essentielle.

La dimension horizontale

Les travaux avanceront-ils du nord au sud, ou du sud au nord ou encore dans d'autres directions dictées par la géographie du lieu ? La question n'est pas anodine, car il faut respecter les bâtiments des alentours, ceux en place et ceux en construction, susceptibles d'être touchés à des degrés divers par les nuisances de chantier.

La dimension temporelle

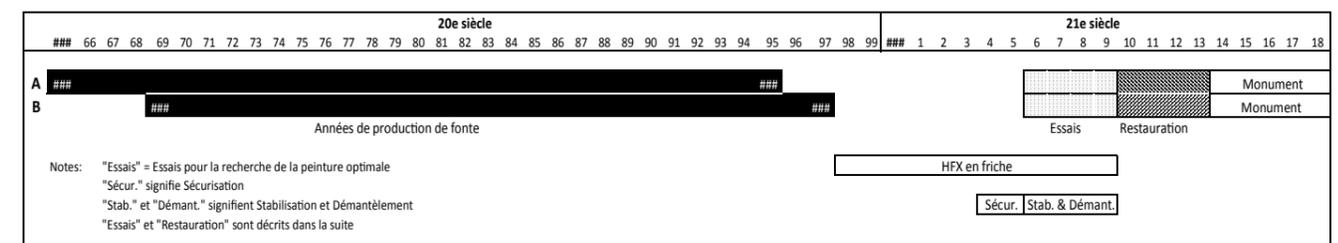
Les travaux des corps de métier demandent un échelonnement précis dans le temps, sous peine de déconvenues et de retards. L'échafaudage précède les constructions métalliques qui précèdent le sablage qui précède la peinture après laquelle l'échafaudage se démonte. A de nombreuses reprises, ce raisonnement se trouve mis à mal par des contingences, des imprévus, - ou des circonstances externes comme une météo défavorable.

Le gestionnaire de chantier doit garder à chaque moment la bonne perspective. S'il observe les choses de trop près, la vue sous le microscope lui fait oublier les grandes lignes, mais vus de trop loin ou de trop haut, des détails importants lui échappent. Garder la bonne distance est comparable à regarder la photo d'un visage dans un journal : de trop près le visage se dissout en un amas de pixels, de trop loin on ne reconnaît plus la personne. Le présent chapitre donne les vues d'ensemble et permet de situer les travaux décrits dans les chapitres suivants.

Le graphique suivant place le chantier dans la perspective de la vie entière des deux hauts fourneaux sur plus de cinquante ans. Quatre grandes étapes en ressortent clairement : hauts fourneaux en service (en noir), en friche (en blanc), en restauration (en pointillés) et enfin comme « monuments dans la cité ».



Bâchage du Haut Fourneau B en 2011



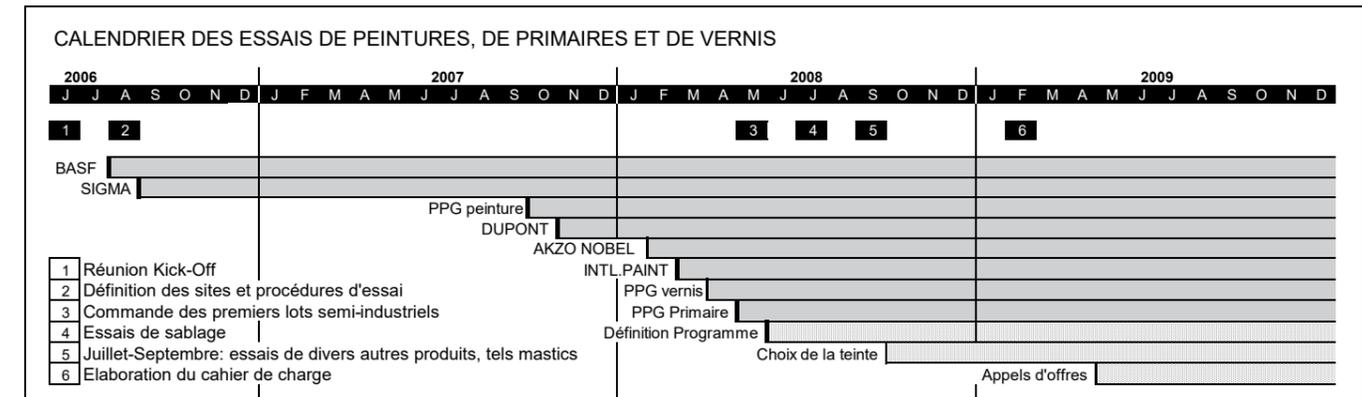
La première étape de la restauration, celle dite de la 'Sécurisation' (2004-2005), consistait à diminuer la dangerosité du site, comme préparation à tous les travaux subséquents : enlever ou remplacer les marches d'escalier pourries, la tuyauterie fragmentée par la rouille, les chemins de câbles éventrés, et mille autres endroits à risque. Ces travaux ont été exécutés par la société Paul Wurth ; le relevé et contrôle final par Luxcontrol. L'étape suivante, appelée 'Stabilisation et Démantèlement', concernait l'application du scénario de restauration voté par le gouvernement. Elle consistait notamment à enlever les bassins de granulation (l'endroit où se trouve maintenant le bâtiment du LIST), le Highway (un passage surélevé en béton qui reliait antérieurement les hauts fourneaux, rendu irréparable par la dégradation avancée du béton), ainsi qu'un des deux halls de coulée (celui du Haut Fourneau A subsiste et sert entre autres comme entrée du site pour les visiteurs). Le temps nécessaire à ces premiers travaux a été mis à profit pour exécuter les essais de peinture, qui s'inscrivaient par nécessité dans le temps long.

Le calendrier des essais de peinture

Le schéma suivant montre la succession des essais qui avaient pour but de sélectionner la meilleure peinture, le meilleur vernis et le meilleur primaire pour le cas très particulier de la protection et la conservation d'une surface historique corrodée. Ces essais se sont étalés sur quatre ans, de la mi 2006 à la fin de 2009.

Comme il n'existait pas de précédent, il fallait commencer à zéro, et tester patiemment, pendant des mois et des saisons, les multiples produits suggérés par les diverses sociétés de peinture. Ces produits ont déjà subi une première sélection, à échelle réduite, dans les laboratoires des producteurs, dont les noms figurent dans le graphique ci-dessous. La succession des tests a été en partie aléatoire, et a dépendu de l'empressement et des capacités des firmes à se lancer dans cette aventure. C'est la raison pourquoi BASF (allemand) et SIGMA (belge) apparaissent en tête des sept concurrents. Au fil des mois, les demandes des responsables du Fonds Belval, basées sur l'accumulation de leur expérience, se sont précisées. Ce choix a permis ensuite l'élaboration de la stratégie du chantier.

Chacune des 8 bandes grises du graphique suivant indique le nom du producteur, le début et la durée des essais d'exposition et des inspections et analyses effectuées. Les inspections se sont poursuivies jusqu'en 2011. Les trois autres bandes blanches renseignent sur des activités annexes, telle l'élaboration détaillée du programme de mise en peinture, accompagnée de son cahier de charge, les appels d'offres et finalement le choix de la teinte ou couleur (qui n'a rien à voir avec celui de la peinture). Enfin, le schéma se complète par une information sur six événements ponctuels qui ont émaillé l'historique des essais proprement dits.



C'est la société PPG qui a été sélectionnée fin 2009 comme fournisseur, tant pour le vernis que pour la peinture. La palme a été remportée par une peinture de type polysiloxane, PSX 700, et par un primaire (appelé souvent 'primer'), riche en zinc. Les polysiloxanes sont expliquées plus loin dans le texte.

Une circonstance qui a favorisé la recherche de la meilleure peinture, a résidé dans le fait que ces essais ont pu se dérouler dans la sérénité, donc sans une pression 'commerciale' de terminer le plus rapidement possible. Le choix final est donc assorti de la plus grande probabilité de succès sur les décennies à venir, puisqu'il a pu s'effectuer dans « le meilleur des mondes possibles » pour l'expérimentateur.

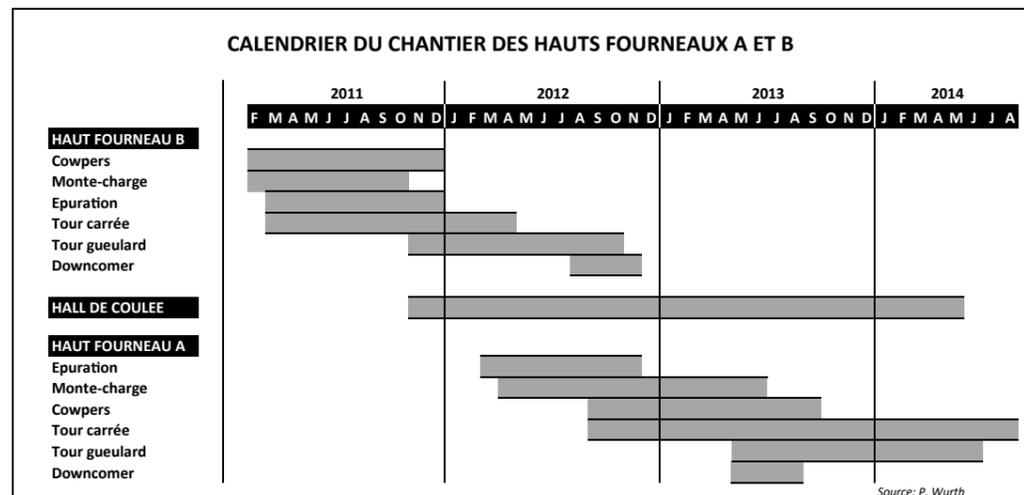
Le calendrier du chantier proprement dit

Le point de départ précis du chantier a été dicté par les circonstances suivantes : au début de 2011, les travaux pour le bâtiment du LCSB (Luxembourg Center for Systems Biomedicine), situé à quelques mètres seulement du Haut Fourneau B, étaient déjà avancés, et il était clair que les premiers occupants allaient bientôt emménager. Il fallait donc commencer au plus tôt le grenailage polluant des installations d'épuration du vent (venturi et le sac à poussière). La suite du planning a découlé de ces conditions initiales. Parmi les contraintes permanentes du chantier, il y avait l'obligation d'ob-

server pour la polymérisation de la peinture une température ambiante d'un minimum de 8°C, ce qui excluait les mois hivernaux. Tout au long du chantier, le planning a toujours gardé le caractère d'une course d'obstacles, mais en fin de compte, les travaux ont pu suivre un « chemin critique » tout à fait acceptable.

Le tableau suivant représente la suite générale des travaux de 2011 jusqu'à la fin de la restauration en 2014 ; il fait suite au calendrier de tests précédents (2006-2009). Le déplacement B→ A n'a pas été linéaire comme le graphique pourrait le suggérer, car bon nombre d'activités se sont chevauchées, intra-hauts-fourneaux, ou inter-hauts-fourneaux. Le chantier a débuté avec le Haut Fourneau B, qui se trouve du côté des bâtiments de l'université, pour se poursuivre, avec quelques zig-zags, en direction du A, face à la Rockhal. L'expérience acquise sur le B, souvent de façon dure, a pu être transposée sur le A, et la restauration de ce dernier a pu avancer de façon plus maîtrisée et plus rapide.

Sur le tableau précédent, la restauration totale est divisée en une douzaine de grands sous-ensembles. Le hall de coulée, adjacent au Haut Fourneau A, est un ouvrage d'une taille si importante qu'il est montré à part, intercalé entre le A et le B.



Chaque bande grise représente la somme de toutes les opérations effectuées, allant de l'échafaudage à la peinture des retouches, en passant par les réparations mécaniques, le grenillage, le vernissage et la peinture proprement dite.

La simplicité du schéma n'est qu'apparente. Dans la réalité journalière, le chantier s'est avéré complexe sous tous les aspects. Tous les sous-chantiers ont été interdépendants. Le décalage des différentes bandes grises a été le résultat de nombreux facteurs, qu'il serait fastidieux d'énumérer ici. La surface disponible pour le chantier, pour les arrivages permanents de matières, les entreposages et les évacuations a toujours été ressentie comme trop exigüe, une caractéristique que ce chantier a probablement partagé avec ceux du monde entier.

La longueur des bandes grises n'est pas forcément proportionnelle à la quantité des travaux fournis, mais a pu se trouver allongée, ici ou là, par des événements contingents, la plupart du temps météorologiques, - épisodes de froid, de pluie ou de vent, - qui ont souvent mis à mal le planning. Le rythme des opérations a suivi le cycle des saisons, essentiellement pour la dépendance de la peinture de la température, déjà mentionnée ; les travaux hivernaux se sont bornés pour l'essentiel à la construction et réparation métalliques, ou encore à la préparation des échafaudages pour la reprise au printemps. Les températures estivales étaient moins préjudiciables du fait que les bâches dont étaient couverts les hauts fourneaux (voir plus loin) ont joué le rôle de parasols et de parapluies.

Encore un mot sur la différence entre les deux hauts fourneaux : même si le A est plus âgé de 4-5 ans que le B, le fait qu'il a été refait à mi-carrière (puis mis à l'arrêt pour des raisons de mauvaise conjoncture du marché de l'acier), alors que le B continuait à produire jusqu'en 1997, a eu comme résultat que le A était en bien meilleur état que son congénère. Celui-ci a présenté le plus de difficultés pour la restauration complète, de sorte qu'il a été décidé de le fermer au public, en dépit du fait qu'il détient le gueulard sans cloche, un fleuron d'ingénierie luxembourgeoise.

La grosse restauration s'est terminée fin 2013 pour l'essentiel, mais des travaux de détails notamment sur l'environnement immédiat (dallage par exemple) se sont poursuivis jusqu'à la mi 2014. Le chantier a ainsi duré 1000 jours, un chiffre rond, qui se retient facilement.

Note : Pour ne pas alourdir le schéma, quelques ouvrages annexes n'y sont pas représentés, comme par exemple la Möllerei, c'est-à-dire la future bibliothèque de l'université, qui a été l'objet d'une restauration largement indépendante, et très différente, de celle des hauts fourneaux, et qui s'est terminée seulement quelques années plus tard.

Le hiatus 2008-2010 et le redémarrage

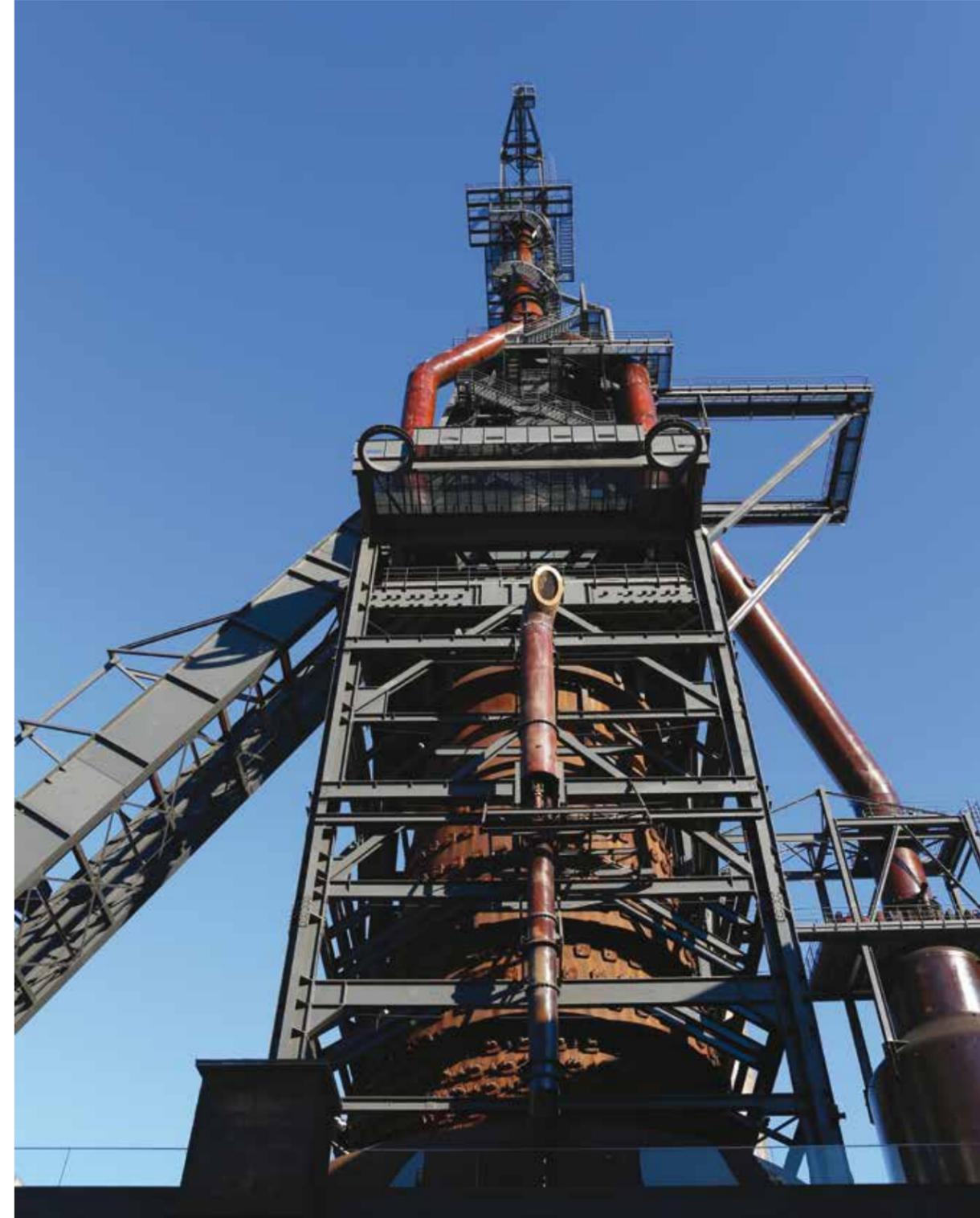
En 2008, le Fonds Belval était en place et avait terminé l'essentiel de ses travaux préparatoires. De leur côté, les essais concernant le choix des

peintures étaient bien avancés. On pouvait envisager de démarrer le chantier à ce moment. Mais fin 2008, la grande crise des subprimes a éclaté aux USA et ses séquelles ont touché rapidement l'Europe et le Luxembourg. Les problèmes qui en résultaient au niveau national risquaient de renvoyer l'ensemble du projet de Belval aux calendes grecques. Malheureusement, l'état des hauts fourneaux se détériorant de jour en jour, les attermoissements risquaient de remettre en cause la pièce centrale du futur campus universitaire. Une solution s'imposait impérieusement.

Vers la mi-février 2010, un nombre de parlementaires ont visité le complexe industriel, et ont pu se rendre compte sur place de l'ampleur des dégâts et de l'urgence d'une intervention rapide.

Le 17 mars 2010, le projet de la restauration a pris un nouveau départ. En présence du ministre Claude Wiseler, les membres de la commission parlementaire pour le développement durable ont convenu de proposer à la Chambre des Députés un amendement de la loi 6065 concernant le site de Belval. Celle-ci avait prévu 25 millions d'euros pour la remise en état des hauts fourneaux et 14 millions pour le Centre National de la Culture Industrielle, le CNCI.

De ce fait, la commission en question, présidée par M. Spautz, a décidé de couper la poire en deux par la proposition de faire voter la Chambre sur le financement de la seule restauration, laissant de côté la partie CNCI. Notons que l'endroit initialement prévu pour le CNCI est occupé de nos jours par le LIST (Luxembourg Institute for Science and Technology). Ce splitting du projet devait permettre de faire passer la loi, et de redémarrer à l'automne suivant les travaux de restauration proprement dits. Les lois furent votées peu après.



PARTIE III Aspects du chantier

6 La recherche de la peinture optimale

Mission impossible ?

Comment restaure-t-on un haut fourneau situé en plein centre-ville, à la verticale de la vie active, sans constituer un danger permanent pour les piétons? Un haut fourneau citadin n'est en rien comparable à celui d'un parc industriel, qui au moindre danger peut être fermé au public. C'était là la question fondamentale à laquelle les responsables de la restauration ont cherché des réponses à partir de 2005.

Pour ce genre de restauration, il n'y avait pas d'antécédent, pas d'expérience, pas de «jurisprudence physico-chimique». Le défi était posé par le master plan du développement de Belval qui plaçait les hauts fourneaux au centre de la nouvelle ville. En même temps, le cahier de charge du Fonds Belval précisait que l'aspect historique de la peau des fourneaux était à sauvegarder sur des surfaces aussi étendues que possible. Cette ligne directrice interdisait a priori l'utilisation d'une peinture industrielle habituelle, par nature opaque, dont on aurait revêtu en bloc toutes les installations. Elle imposait l'utilisation de couches transparentes, c'est-à-dire des vernis. Mais un vernis n'est pas une peinture, ou, plus précisément, un vernis est un produit auquel manquent les ingrédients qui font qu'une peinture soit pérenne, c'est-à-dire résistante aux UV, résistante aux agressions chimiques de l'atmosphère, et à adhésion sans faille sur l'acier. Par contre, un vernis est le seul produit à respecter la charte de la restauration, dans le sens que par sa transparence, il préserve l'aspect historique.

Les outrages du temps en milieu industriel avaient abîmé de façon différente les différents matériaux constitutifs de l'ouvrage, les aciers, les fers et les fontes, et avaient laissé une mosaïque d'aires panachées, bariolées, mâtinées. Garder cet aspect historique signifiait qu'il fallait conserver la rouille sous-jacente ; mais cela signifiait qu'on serait obligé d'appliquer les vernis sur une surface corrodée, c'est-à-dire sur une surface pour laquelle ils n'ont évidemment pas été développés. L'échec était-il programmé ?

Il ne suffisait donc pas de prendre le premier produit venu, fût-il d'excellente réputation, car l'état corrodé des surfaces s'opposerait à une bonne adhérence. D'où la question: existait-il, quelque part dans le monde, un vernis aux propriétés d'adhésion si puissantes qui convienne à des surfaces aussi peu orthodoxes que la peau d'un haut fourneau âgé?

Confrontés à ces problèmes, nombre de producteurs de peinture, nationaux et internationaux, ont refusé d'entrer dans ce jeu. Il ne restait que les plus grands - Dupont de Nemours, Sigma, PPG, BASF-Rhenus, et International Paint, - pour relever le défi. L'ampleur et la nouveauté du chantier les ont sans doute interpellés et leur ont semblé justifier la mobilisation de leurs centres de recherche.



Les leçons des ouvrages métalliques anciens

Au début de la recherche des vernis, on se trouvait en terre inconnue. Seuls quelques ouvrages métalliques anciens comme le pont de Coalbrookdale en Angleterre (1779), la tour Eiffel (1889), l'épave du Titanic (1912) et le Golden Gate Bridge de San Francisco (1937), pouvaient fournir quelques indices pour la protection anticorrosive à long terme :

Le pont de Coalbrookdale, le plus ancien ouvrage métallique du monde, et vieux de presque 250 ans, est constitué de fonte. Les dégâts dus à la corrosion sont minimes, en dépit de l'âge de l'édifice, du fait que la fonte ne corrode que très lentement par rapport à l'acier. Le fait s'explique par la formation de graphite superficiel qui agit comme couche protectrice. Les résultats de Coalbrookdale se laissent transposer en partie aux éléments en fonte des Hauts Fourneaux de Belval, mais il fallait vérifier s'il s'agissait d'une fonte de composition similaire. Ce qui n'était pas le cas.



Tour Eiffel à Paris

La tour Eiffel se conserve par l'application régulière, tous les 7 ans, d'une nouvelle couche de peinture. L'ouvrage en est à sa dix-neuvième. Ce mille-feuille de couches n'a pu préserver l'intégrité de la tour que parce que la structure est constituée d'une seule sorte d'acier (dans ce cas : l'acier puddlé de Pompey). Sans cette homogénéité, des effets électrochimiques, qui se créent inévitablement au

contact de métaux différents, auraient eu raison de l'œuvre de Gustave Eiffel – car celui-ci, pour diverses raisons, a décliné la galvanisation de sa tour. La tour Eiffel n'est pas une batterie, mais les hauts fourneaux en sont.



Paquebot «Titanic»

L'épave du Titanic est le seul ouvrage de la présente série, à se dégrader à grande vitesse, tant et si bien qu'elle se sera dissoute – au sens propre du terme – d'ici quelques décennies. La raison est que l'épave, constituée de multiples matériaux, est une gigantesque batterie, en d'autres mots, une victime de l'effet électrochimique précité, - qui se trouve en plus accéléré par la dégradation bactérienne. Cette

dégradation biologique est le fait de bactéries sidérophiles dont le métabolisme tire l'énergie nécessaire à sa vie par la conversion de fer métallique en sels de fer, d'où la dissolution. Des tubercules de ce genre ont également été trouvés sur la peau des Hauts Fourneaux de Belval, et ont suggéré une attaque bactérienne similaire.



Golden Gate Bridge à San Francisco

Le Golden Gate Bridge qui enjambe la baie de San Francisco illustre l'intensité de la lutte à mener pour préserver un ouvrage en acier dans les pires conditions environnementales, car attaqué d'un côté par les chlorures des embruns maritimes, et de l'autre par le dioxyde de soufre émanant des navires qui passent en dessous et du trafic qui passe par-dessus. Le pont dispose d'un chantier d'entretien installé à demeure.

Tous les effets physico-chimiques et biologiques précités s'appliquent à Belval. Il s'y est ajouté un défi supplémentaire, mentionné plus haut, à savoir l'imposition d'un vernis. C'est cette exigence qui a complexifié la donne, car elle a barré le recours aux solutions traditionnelles. Force était donc d'emprunter la voie empirique, c'est-à-dire l'analyse minutieuse, par des essais lents et longs, du comportement d'une multitude de produits avec l'espoir de dénicher l'oiseau rare.

La longue période d'essais 2007-2009

Pour commencer, il fallait inventorier une grande variété de matières et de méthodes. A priori, le nombre de choix possibles était pléthorique. Prendra-t-on des polyuréthanes, des polyesters, des alkydes, des époxydes, des acryliques, des phénoliques, etc ; quid des méthodes de nettoyage de la surface : du sablage, du grit, de l'eau à 300 bars, ou 500, ou 1000 ? Se dirigera-t-on vers une double ou, une triple couche. On risquait d'avoir besoin de milliers de surfaces d'essai, - ce qui était évidemment exclu. Fort heureusement, on a pu se servir d'une méthodologie pour le design rigoureux d'essais, une démarche mathématique qui permet de réduire fortement le nombre d'essais, sans pour autant trop perdre en information.



Essais peintures en 2008

Les échantillons de vernis (et aussi de peintures), ayant passé un premier screening auprès des R&D des quatre firmes concurrentes, ont été appliqués sur les surfaces-test des hauts fourneaux, avec des méthodes de nettoyage et de préparation variables. Un facteur supplémentaire a été l'orientation géographique des surfaces à peindre (vis-à-vis de la pluie, du vent, du soleil).

Le problème d'échelle

Un aspect fâcheux et récurrent en technologie, la hantise de tout prototype, est le problème d'échelle, dans le cas de Belval, il se formule comme suit : à la fin des essais, quand le choix des revêtements sera arrêté, il se posera la difficile question de l'extrapolation de ces résultats dans l'espace et dans le temps :

D'abord, l'aspect visuel satisfaisant au niveau des échantillons d'un ou de deux mètres carrés le sera-t-il également sur une surface cent fois plus grande où de nouveaux effets, comme ceux de la luminosité, des effets de perspective et de réflexion peuvent se manifester ? Secundo, leur comportement anticorrosif, excellent sur la durée de deux ans, le sera-t-il aussi sur une durée de dix ou vingt fois plus longue, pendant laquelle des variables externes, imprévisibles maintenant, peuvent apparaître ? Si les essais sont bien menés, la probabilité de ne pas se tromper sera élevée, mais ce ne sera jamais la certitude absolue. Qu'aurait répondu Séjourné si on lui avait demandé si son pont Adolphe allait tenir aussi longtemps que le pont du Gard ? Mais trêve de philosophie.

Les surfaces témoins une fois préparées, commençait le long temps d'attente, le temps pour observer et pour mesurer, et cela sur plusieurs saisons. Au bout de quelques mois, la bonne tenue de tels vernis et la dégradation spectaculairement prématurée de tels autres, au grand dam des producteurs, montraient que la surface rouillée avait introduit une grosse inconnue dans l'équation. Seule l'accumulation de l'expérience permettait de fournir le fil d'Ariane.

Ces travaux ont été réalisés par Stéphane Frieres, la cheville ouvrière du chantier des hauts fourneaux, et par l'auteur de ces lignes.

Les polysiloxanes

Le choix a finalement porté sur les peintures et vernis de la famille des polysiloxanes, proposées par les firmes PPG et International Paint. C'est la variante vernis PSX-700 de PPG qui a eu l'adjudication.

Les polysiloxanes ont montré d'excellentes performances sur les surfaces d'essai de Belval, et ont comme bonus le fait d'être écologiques (dans le sens qu'elles s'appliquent avec une fraction seulement du solvant des peintures traditionnelles).

Elles sont constituées d'une structure moléculaire polymérique silicium-oxygène, qui en accentue le caractère inorganique, et se comportent par là comme des émaux vitreux liquides. La qualité intrinsèque de ce vernis est capable de contrebalancer son manque d'adjuvants et d'additifs.

Il est intéressant de juxtaposer la structure d'une peinture traditionnelle à celle d'un polysiloxane de la façon suivante:



Essais vernis en 2009

Traditionnelle : ..-C-C-C-C-C-C-C-C-C-C-C-C-.. ou ..-C-C-O-C-C-O-C-C-O-C-C-O-..

Polysiloxane : .. Si-O-Si-O-Si-O-Si-O-Si-O-...

L'atome de carbone (C) des peintures traditionnelles est remplacé dans le cas des polysiloxanes par celui d'oxygène et de silicium (Si-O) .

Quant au choix pour le primaire, indispensable pour les peintures des éléments de structure, il est tombé sur un époxyde lourdement chargé en poudre de zinc, dont l'effet est de recouvrir les hauts fourneaux comme d'une carapace galvanisée, qui assure la protection électrochimique, -celle justement qui manque à la tour Eiffel et au Titanic.

Le vernissage des hauts fourneaux mérite deux commentaires.

D'abord, le vernis est luisant. Trop luisant, objectera un tel, un puriste qui maintient qu'un haut fourneau n'est pas une carrosserie automobile, qu'en service actif il a toujours été mat et sale, et qu'un aspect trop lisse fait fi de l'aspect historique. Le Fonds Belval était toujours conscient du paradoxe. Il a pourtant choisi un vernis brillant, et justifié sa décision comme suit. La longévité d'une surface vernie augmente avec sa brillance, car la brillance est synonyme d'absence de porosités microscopiques, donc d'absence de points d'accrochage pour la saleté, et donc d'absence d'endroits initiateurs de corrosion. La pyramide du Louvre utilise un verre spécial non poreux,

pour la même raison. Une surface brillante est en plus autonettoyante, par l'action de l'eau de pluie. Quand le « monument-dans-la-cité » de Belval a été inauguré, la différence d'âge entre les vernis les plus âgés et les plus récents était de plus de deux ans, et il aurait été fâcheux de voir des différences déjà à ce moment, ce qui aurait été le cas avec des produits mats ou satinés. Que les puristes se consolent cependant : les outrages du temps feront qu'au bout d'autant d'années, le vernis aura fini par devenir plus mat.

La seconde caractéristique du vernis est sa capacité de relever et de rafraîchir les coloris qu'il recouvre de sa transparence et d'en accentuer les différences. Tel élément de surface, auparavant tristement grisâtre, présente d'un coup, après vernissage, des couleurs vives. Cette métamorphose existe tant à petite échelle, au dm², qu'au niveau des grandes aires visibles de loin. Voici un exemple : avant restauration, on aurait parié qu'au Haut Fourneau A, les gros cylindres verticaux des cowpers avaient une couleur identique à celle des trois volumes similaires de l'épuration des gaz qui leur sont proches, mais le vernis (ici appliqué sur les peintures d'époque) a révélé deux gris dissemblables, une différence visible de loin, qui brise avantageusement la monotone monochromie d'avant. Par ailleurs, les coulures de rouille sur les flancs des venturis apparaissent maintenant claires et nettes, et comme leur source s'est tarie, la blessure fermée, leurs trainées rouges seront figées, comme des reliques, dans le temps et dans l'espace.

Les systèmes de peinture retenus pour la pratique du chantier ont été les suivantes (un micromètre, signifie millième de millimètre) :

a) pour les structures portantes :

ACIER NU	Primaire au zinc 75μ	Finition au PSX 700 125 μ
----------	----------------------------	---------------------------------

Procédures

Les structures portantes, comme par exemple la Tour Carrée, ont été nettoyées par un grenailage standard (décrit plus loin), qui met l'acier à nu, sur lequel a été appliquée une couche de primaire époxy au zinc, épaisse de 75 micromètres. Cette couche est peinte à la brosse – et non au pistolet – car bien que plus lente, la technique à la brosse est plus précise et permet de mieux contrôler toutes les surfaces et d'arriver dans les coins et recoins plus inaccessibles à d'autres techniques.

La finition au PSX 700 s'est faite en deux étapes : dans un premier pas, dit « en prétoche », les surfaces anguleuses, comme par exemple les arêtes de poutrelles et de têtes de boulons, ont été enduites à la brosse ; en deuxième étape, la surface entière a été peinte, au pistolet cette fois. L'épaisseur finale du PSX est de 125 micromètres.

b) les vernis pour les surfaces d'aspect historique

ACIER ROUILLÉ ET NETTOYÉ	Vernis Amerlock Sealer en mono-couche
	Vernis PSX 700

Pour ce qui est du vernis, il a été appliqué sur la surface rouillée, mais préalablement nettoyée à haute pression, une première couche de 40 microns d'un époxy transparent dit 'bouche-pore' de la marque Amerlock Sealer, un produit sans solvant et bon pénétrateur de rouille. La finition a consisté en deux couches d'environ 25-50 microns chacune, de PSX 700 Clearcoat, portant l'épaisseur à quelques 120 microns.

Le nettoyage des surfaces historiques s'est fait au moyen d'un jet d'eau à haute pression, additionnée le cas échéant de détergents pour enlever les restes d'huiles et de cambouis. En fonction de la couche de corrosion et de rouille, la pression de l'eau de nettoyage a varié entre 250 et 500 bars, de façon à enlever les croûtes d'oxydes plus dures, sans pour autant trop empiéter sur l'état historique des surfaces. Ce nettoyage a été le sujet de bien des recherches et de mises au point. Les vernis ont été appliqués également en prétoche à la brosse, suivie de l'application générale au pistolet.



Chantier en 2011

7 Echafaudages – bâchages – sécurité

De la grotte de Lascaux aux Hauts Fourneaux de Belval

Sans échafaudages, pas de grands édifices. Sans ces structures auxiliaires, il n'y aurait ni Colisée, ni Panthéon, ni les cathédrales. Et pourtant, les échafaudages historiques ont disparu, sans traces et presque sans souvenir. L'histoire de l'architecture n'a retenu la mémoire que de quelques rares exemplaires.

Ainsi par exemple le tout premier échafaudage de la civilisation humaine est celui de la grotte de Lascaux, dont les fresques remontent à l'âge de la dernière ère glaciaire, il y a plus de 18000 ans. Pour peindre des bisons à plusieurs mètres de hauteur, nos ancêtres préhistoriques ont fabriqué des échafaudages ; les archéologues ont découvert en effet dans ces grottes, à mi-hauteur des parois, des alignements réguliers de trous, preuve de l'implantation d'une structure en bois, ancêtre de l'échafaudage.

Beaucoup plus près de nous, aux premières lueurs de la Renaissance italienne, c'est-à-dire au début du Quattrocento, les archives ont conservé le détail d'un échafaudage extraordinaire, celui qu'avait imaginé l'architecte florentin Filippo Brunelleschi pour la construction de la coupole du dôme de Florence.



Chantier en 2013

De cette ère, un autre échafaudage fameux vient à l'esprit, celui qu'a fait édifier Michel-Ange en 1508 pour peindre le plafond de la Sixtine. Cet échafaudage épousait les angles, voussures et lanternons de la Chapelle, une construction sur laquelle il ne pouvait peindre que couché, du moins d'après la légende.

Tous les échafaudages des grands édifices anciens ont buté sur la même difficulté quand les élévations dépassaient la hauteur d'un tronc d'arbre. Dans le cas d'une cathédrale, un échafaudage ne pouvait s'élever sur toute la hauteur: il devait donc monter en même temps que l'édifice gagnait en hauteur. On parle alors d'échafaudage 'indépendant' ou 'encastré'. C'est la raison pour laquelle les anciens édifices sont parsemés de trous d'ancrage et de pierres d'attente, c'est-à-dire de pierres de taille proéminentes dans la maçonnerie, pour servir de support d'échafaudage lors de la construction ou lors des campagnes de réparation et d'entretien.

Tout au long de l'antiquité et du moyen âge, les principes de la construction reposaient sur l'expérience et l'intuition des architectes, et non sur le calcul. Les premiers principes mathématiques et physiques qui y avaient trait, ont été énoncés vers 1680 par le savant anglais Robert Hooke (1635-1703). La loi de Hooke quantifiait pour la première fois la proportionnalité entre l'extension des matériaux et la tension à laquelle ils étaient soumis, et permettait désormais d'établir les calculs d'élasticité des ouvrages.

En 1773, le physicien français Charles de Coulomb, le même qui a découvert les lois de l'électrostatique, est parvenu à résoudre les équations différentielles décrivant le phénomène de la flexion des matériaux, un pas essentiel vers la compréhension des structures. Ensuite, au début du 19^e siècle, Henri Navier, mathématicien français, connu pour la loi dite de Navier-Stokes décrivant l'écoulement des fluides, a fondé la théorie générale de l'élasticité, développant ainsi la science de la statique des ouvrages à l'aide d'une méthodologie encore valable de nos jours.

Certains types d'édifices n'ont guère eu besoin d'échafaudage, telles par exemple les pyramides, où l'on s'est servi de rampes de terre, les constructions métalliques comme la tour Eiffel, ou encore l'Empire State Building, où l'on a utilisé l'édifice en construction comme son propre échafaudage. Précisons toutefois que la première partie de la tour Eiffel, celle qui se termine par la plateforme à 57 m, a quand même nécessité d'importants échafaudages en bois pour la mise en place des 4 arches inclinées.

De l'antiquité jusqu'à la Révolution Industrielle, les échafaudages étaient invariablement en bois. Avec l'avènement de la construction métallique dans le dernier tiers du 19^e siècle, on aurait pu croire que l'ère du bois se terminerait rapidement. Cela n'a pas été le cas. L'acier ne peut substituer le bois que sous forme de tubes, pour des raisons de poids, ou de rapport

poids/rigidité, mais les tubes en acier, à ce moment, étaient encore chers à produire, et leur emploi se limitait aux emplois haut de gamme, c'est-à-dire aux réseaux de distribution d'eau et de gaz de ville. Par ailleurs, il est évident que les tubes pour échafaudage, exposés aux intempéries, devaient être protégés contre la corrosion, donc galvanisés. Mais bien que la galvanisation ait été inventée en 1836 par Stanislas Sorel à Paris, cette technologie était également trop coûteuse pour s'employer dans cette application. On n'a même pas songé à galvaniser la tour Eiffel – une omission qu'on regrette à ce jour.

Les entrepreneurs continuaient donc à utiliser le bois, et les échafaudages gardaient leur aspect d'antan : on utilisait des troncs de sapin, plantés dans de vieux tonneaux remplis de sable damé.

Au Luxembourg, le plus fameux échafaudage en bois a sans doute été celui utilisé en 1905 pour le Pont Adolphe, dont la double arche enjambe la Pétrusse à une hauteur de 64m. Le constructeur, l'ingénieur français Séjourné, avait imaginé à cet effet un échafaudage particulier, que l'on devait plutôt appeler gabarit. Ce gabarit mobile, réplique exacte et en creux, de l'arche de pierre, était construit sur glissières pour pouvoir servir pour les deux arches, une construction hardie que le photographe de la cour, Bernhoeft, a minutieusement documenté dans un bel album de l'époque. Dans l'univers de l'échafaudage, d'importants changements sont intervenus après la première guerre mondiale, quand le forgeron italien Ferdinando Innocenti (qui s'est distingué plus tard par ses Lambrettas, puis les

Minis) a inventé le 'Tubo Innocenti', un échafaudage métallique de type meccano qui se caractérisait par l'emploi de colliers spéciaux pour une pose rapide. A peu près à la même époque, les ingénieurs Daniel-Palmer Jones au Royaume Uni et Vigier en France ont déposé à leur tour des brevets pour des échafaudages à base de tubes d'acier, également avec joints et raccords métalliques brevetés.

Un avantage imprévu des échafaudages en acier s'est révélé dès les premières mises en œuvre : on s'est rendu compte qu'il était possible de les construire non seulement de bas en haut, mais également de haut en bas. Il suffit d'avoir un point d'accrochage solide - et une équipe expérimentée. Cette façon de faire est évidemment impossible avec un échafaudage en bois.

Au début des années 1930, un des premiers producteurs à promouvoir des tubes d'acier bon marché a été une société métallurgique française devenue plus tard Vallourec, aujourd'hui spécialisée dans les oléoducs et gazoducs. Un échafaudage de tubes fut utilisé pour la première fois en 1935 pour la restauration de la flèche de la cathédrale Notre Dame de Paris. Les maîtres d'ouvrage pouvaient mesurer tout de suite les avantages que cette façon de faire apportait en matière de sécurité pour les ouvriers. Mais les difficultés économiques de l'époque et la guerre mondiale ont fait que ces nouveautés ont tardé à s'imposer. Elles ne se sont répandues qu'une vingtaine d'années plus tard, lors de l'époque de la reconstruction de l'Europe. Sur les chantiers des années d'après-guerre, certains se rappellent encore les camions qui amenaient les sapins, placés en oblique, avec le gros bout du tronc dans la benne, et l'autre extrémité dépassant la cabine du chauffeur. Sur le chantier, on reliait les troncs verticaux, au moyen de cordages, aux moises et traverses horizontales, un peu comme on continue à le faire de nos jours dans les pays asiatiques avec les échafaudages de bambou. Ces vacillants échafaudages en bois restaient encore longtemps la règle. Ce n'est qu'au début des années 1960 que deux ouvrages importants, la construction du barrage d'Esch-sur-Sûre et celle du pont Grand Duchesse Charlotte, le Pont Rouge, ont amené des changements importants.

On a pu voir à Esch-sur-Sûre la première utilisation de coffrages d'acier, assimilables à un échafaudage d'un genre particulier, mis en place suivant un plan précis et rigoureux. C'est à partir de cette période que l'acier a commencé à déplacer le bois dans les structures auxiliaires.

La construction du Pont Rouge a fait usage des techniques les plus avancées de cette époque : le pont est constitué de caissons préfabriqués en acier à haute limite d'élasticité, assemblés sur chantier par boulonnage et soudage, - mettant fin à l' ancestrale technique du rivetage. Sur le chantier du Pont Rouge, les échafaudages en tubes d'acier ont été mis en œuvre suivant deux modes : d'abord comme piliers auxiliaires pour soutenir la



Mise en place des échafaudages sur cowpers du haut fourneau B en 2011

structure pendant l'assemblage, et dans la phase finale, pour servir de plateformes suspendues et mobiles pour la galvanisation des structures et leur mise en peinture.

Il est intéressant de noter les différences entre le Pont Rouge et le Haut Fourneau A, qui sont quasi contemporains. Alors que le pont fut soudé, le haut fourneau fut encore en partie riveté. L'autre différence tient dans les efforts de conservation : alors que le pont fut minutieusement préparé contre la corrosion, par une couche de galvanisation, puis un primaire, suivi de couches de peintures de finition, on ne se donnait pas cette peine pour le haut fourneau. Cette différence tient dans la vue du constructeur par rapport à sa création : un pont est en principe construit pour des générations, alors que le haut fourneau est un outil dont la durée de vie est limitée par les progrès de la technologie. Mais l'histoire est imprévisible, et quand un haut fourneau devient monument, tout change.

La sécurité au travail

Les années des Trente Glorieuses ont également vu apparaître une évolution notable des conditions de travail, par une prise en compte de la sécurité des hommes et des femmes travaillant sur les chantiers. Jusque-là, les accidents de chantier étaient fréquents et souvent mortels, mais on les regardait comme une fatalité, qui de toute façon ne touchaient que les classes défavorisées. Pour les ouvriers exposés aux dangers des chantiers, les beaux discours sur l'égalité et la fraternité n'étaient que paroles en l'air. En cela, la première moitié du 20^e siècle ne se distinguait guère des siècles antérieurs. Aux USA, on avait l'habitude de compter en moyenne 1 mort pour chaque million de dollars de coûts de chantier. Mais c'est également aux USA que la sécurité sur le chantier a été prise en compte pour la première fois dans les années 1930 lors de la construction du Golden Gate Bridge à San Francisco. Le maître d'œuvre a fait tendre des filets de sécurité, ce qui a permis de réduire le nombre d'accidents mortels de deux tiers par rapport aux chiffres habituels.

En Europe, on a dû attendre l'après-guerre pour que les législateurs s'éveillent aux problèmes de sécurité et mettent en place des règles contraignantes. L'accident de chantier a cessé d'être perçu comme une fatalité et était désormais considéré comme le résultat d'une coupable négligence. Des recueils comme l'Euronorme EN 12811-1:2003, précis et détaillés, insistent sur les aspects de sécurité les plus divers, tels par exemple sur les indispensables garde-corps, qui doivent protéger les ouvriers contre les chutes. Dans ce contexte, on peut mentionner que la construction du Pont Rouge s'est déroulée sans aucun accident grave, une première en son genre.

Un autre aspect nouveau fut l'avènement de la réflexion écologique dans les années 1980, en l'occurrence l'idée de la préservation de l'environnement dans le pourtour du chantier. C'était une idée en rupture avec les habitudes d'antan: un chantier ne devait plus être une source de nuisances en tous genres, pollution chimique, pollution acoustique, pollution de particules et de déchets, mais il devait respecter désormais l'environnement et ceux qui l'habitent. A nouveau, la construction du Pont Rouge a été exemplaire et a préfiguré ces soucis de propreté environnementale : ainsi par exemple, le sablage et la galvanisation des structures métalliques se sont déroulés en « vase clos », effectués à partir de plateformes de travail étanches, de façon qu'aucun sable ni aucune poudre de zinc n'ait pu tomber sur les maisons et propriétés de la vallée de l'Alzette.

Parmi les mesures environnementales les plus visibles a été l'introduction du bâchage dans les dernières décennies du 20^e siècle. Comme il était désormais possible de produire à prix raisonnable de grandes bâches imperméables, ces dernières ont été imposées sur les chantiers urbains les plus sensibles. Parmi les premiers bâchages au Luxembourg on peut mentionner celui qui en 1993 a voilé pendant de longs mois le palais Grand-Ducal, et qui était décoré d'un trompe-l'œil de la façade en restauration. Mais dans ce cas il s'agissait plutôt d'un écran optique, dont les propriétés esthétiques l'emportaient sur les écologiques, et dont les performances



Mise en place du bâchage sur cowpers du haut fourneau A en 2013

environnementales n'égalait pas celles du bâchage imperméable utilisé sur le chantier de Belval.

Du point de vue de leur volume, les échafaudages de Belval ont été les plus importants dans l'histoire de la construction au Luxembourg. Ce qui est vrai pour le volume, l'est également pour la hauteur. Si le barrage d'Esch fait environ 50 mètres de haut, et si la vallée enjambée par le Pont Adolphe est presque aussi profonde que la tour de la cathédrale est haute, c'est à dire environ 70 m, les hauts fourneaux atteignent 85m. Evidemment, cette ampleur a un prix : la mise en place de si importants échafaudages ne s'improvise pas, car les aspects de la sécurité sont trop importants. Le maître d'œuvre était obligé de suivre une procédure précise.

La première réflexion en pareil cas est de partir de la finalité de l'échafaudage : quels travaux y seront effectués, quelles masses y sont déchargées et transportées, et en quelles quantités, combien d'hommes doivent pouvoir y travailler sans se gêner mutuellement, etc.

Ensuite, un plan détaillé de construction a été élaboré qui tenait compte de l'ensemble des contraintes physiques, ainsi que de l'ouvrage sur lequel l'échafaudage venait s'appuyer. Un tel plan devait également prévenir le contreventement et le flambage, c'est-à-dire les déformations et les fléchissements. Il fallait donc prévoir suffisamment de traverses disposées



Plan de montage de l'échafaudage - tour carrée du haut fourneau B



judicieusement suivant les grandes lignes de force, ou des croix de Saint-André (deux traverses en X) pour rigidifier la structure. La stabilité au sol devait être assurée par un bon ancrage, et celle en hauteur par des systèmes de chevillage et d'accrochage pour arrimer l'échafaudage solidement à la masse du haut fourneau, tout cela pour combattre efficacement les deux grands ennemis de tout échafaudage : la gravité terrestre et le vent. L'effet de la première est constant, mais le vent est capricieux et à 80 mètres de hauteur, il est de deux à trois fois plus puissant qu'au niveau du sol; l'anémomètre rythmait le travail quotidien. Un bureau de contrôle spécialisé a vérifié le détail des aspects statiques.

La construction de l'échafaudage pouvait alors être entamée, sous la surveillance d'organismes de contrôle tel Luxcontrol, ceci pour vérifier la conformité des réalisations avec les données des calculs et du plan, procédure qui s'est terminée par la réception de l'ouvrage. Les contrôles ont continué tout au long du chantier. Au fur et à mesure que les travaux avançaient, et que les échafaudages étaient adaptés, augmentés ou déconstruits, pour suivre le cours des opérations, des inspections visuelles avaient lieu toutes les 48 heures. Les sociétés chargées de la construction et de la maintenance des échafaudages étaient la firme luxembourgeoise Echolocation et la firme allemande BSB, qui pour la durée du chantier avaient constitué un consortium.

Le bâchage

La solidité et la sécurité des échafaudages est une chose, l'aspect environnemental en est une autre, on l'a déjà évoqué plus haut. Dans le cas particulier de Belval, la proximité des immeubles adjacents, tel par exemple le bâtiment du LCSB, a exigé l'emploi d'un bâchage étanche.



Plan de montage de l'échafaudage - tour carrée du haut fourneau B

Pour chacun des hauts fourneaux, l'échafaudage a évolué suivant des cycles, une phase de construction, suivie d'une longue phase de déconstruction. Lors de la phase ascendante, longue de plusieurs mois, les travaux des autres corps de métier, constructions mécaniques, sablage, mise en peinture se sont fait ensemble avec la montée en hauteur de l'échafaudage. Pour le Haut Fourneau B, le point culminant était atteint le 14 août 2013. A partir de ce moment, le chemin inverse a été entamé, également sur des mois, pendant lesquels l'échafaudage a été démonté, et pendant que les autres corps faisaient les travaux complémentaires, les peintres procédaient aux retouches, c'est-à-dire la réparation des parties non encore peintes, car cachées par les points d'accrochage de l'échafaudage. Cette description est quelque peu simplifiée, car la montée-descente n'était pas linéaire, du fait que la structure d'un haut fourneau est plus compliquée que celle par exemple de la tour du bâtiment de l'Université du Luxembourg (qui en août 2013, était également enveloppé d'un échafaudage), et que les grandes phases étaient par nécessité entrecoupées de nombreux zig-zags et aller et retours.

Les hommes qui montent et démontent les échafaudages, sont de véritables professionnels. Ils doivent développer une bonne intuition des forces en présence, et sentir à tout moment si les tubes qu'ils mettent en place travaillent sous pression ou sous tension. A cela s'ajoute la force physique conjuguée à l'adresse corporelle et au sens de l'équilibre. Il n'est pas donné à tout le monde de manipuler avec aisance un tube long de 6 mètres pesant 24 kilos, de le passer par la verticale, le cas échéant par un temps venteux, et de l'enfiler adroitement et sans tâtonnements fébriles dans l'embout du tube précédent. Il leur faut assimiler les principes de la

statique, des moments d'inertie, du cheminement des lignes de force, et savoir mettre en pratique ces notions abstraites. Le poids total des tubes d'échafaudage nécessaires à chaque haut fourneau, était équivalent à une cinquantaine de charges de semi-remorques, et les tubes mis bout à bout se seraient étendus sur plus de 200 km.

On a assisté à un phénomène psychologique intéressant : au début de ce chantier, qui était fort différent de ce que les échafaudagistes avaient connu jusqu'ici, un certain désarroi s'était emparé de l'équipe : comment s'y prendre avec ces tours noires et menaçantes, où attacher les pièces, où les sécuriser. L'échafaudage démarrait avec une lenteur désolante. Et puis au fil des jours, les hommes ont surmonté une difficulté après l'autre, se sont aguerris, se sont dépassés et les différents étages se sont érigés à une vitesse croissante, au point que l'équipe finissait par s'en étonner elle-même.

Un tel bâchage a un but double : isoler le monde extérieur des nuisances de chantier, et inversement, protéger les travaux des intempéries. Quand la bâche est bien drapée autour du haut fourneau, il est possible d'aménager dans cette enceinte isolée une sous-pression au moyen de pompes aspirantes équipées de filtres. Ce confinement permet de capter les grandes quantités de poussières et d'aérosols de peintures et de vernis qui résultent des opérations de sablage et de mise en peinture.

La bâche protège également la surface du haut fourneau durant le laps de temps où le sablage a mis à nu l'acier et que la première couche de peinture



Soudure de bâche thermorétractable

n'est pas encore appliquée. Dans cet état, une averse peut faire beaucoup de dégâts, car la corrosion d'une surface métallique avivée par le sablage est très rapide et peut anéantir le travail de nettoyage.

Le but du bâchage a évidemment été technique et environnemental, mais subrepticement, un autre aspect s'y est glissé, plus esthétique voire artistique: les hauts fourneaux ainsi bâchés et emballés, tout de blanc vêtus, ont involontairement fait penser aux réalisations de Christo, l'artiste « qui emballe la géographie et l'histoire », le grand empaqueteur d'édifices, que ce soit le Reichstag à Berlin, ou le Pont Henri IV à Paris, ou encore le paysage du Central Park à New York. Christo n'a jamais enveloppé de haut fourneau, mais à Belval la technique s'en est chargée, et y a créé au cours des étés 2011 et 2012 une œuvre d'art unique, mais éphémère, dont seules la photo et la mémoire du spectateur garderont le souvenir.

L'ampleur des volumes à emballer a soulevé bien des problèmes. Où trouver de telles bâches, aussi grandes que les voilures d'un clipper, et où aller chercher l'équipe qui sait les apprêter, les mettre en place, sans les froisser ni les endommager ? De quelle matière doivent-elles être faites, pour tenir suffisamment longtemps, et comment en disposer après usage ? Et à quelles normes doivent-elles répondre ? L'administration de l'environnement a tranché : comme les bâches seraient incinérées après usage, elle a interdit d'utiliser la matière la plus courante, la plus en usage, à savoir le chlorure de polyvinyle. Il fallait donc trouver des bâches à base de polymères d'oléfines et de paraffines. Ces surfaces sont généralement produites par extrusion, ce qui a l'avantage de leur donner des propriétés physiques bi-orientées, bien pratiques pour la thermo-rétractabilité requise. Par ailleurs, pour l'application de Belval, les bâches doivent être difficiles à enflammer, voire ininflammables, et, en même temps inoffensives comme déchets. L'ensemble des restrictions n'a laissé subsister qu'un seul producteur, une firme lyonnaise, capable de produire les grandes surfaces requises dans une matière polymérique nommée Verisafe B1. On peut noter que son in-inflammabilité vient au prix d'une résistance réduite vis-à-vis des rayonnements ultraviolets solaires. En fin de compte, il s'est avéré que les bâches lyonnaises étaient capables de tenir une année à peu près, durée qui s'est avérée suffisante pour la mise en peinture d'un haut fourneau. Restait à trouver les « matelots pour hisser les voiles ». La plupart des firmes qui font ce métier sont des PME, qui ne disposent pas des 7 à 8 personnes nécessaires pour ce travail au niveau des hauts fourneaux. Il était impératif que les bâches s'appliquent sans être froissées, faute de quoi elles ne pourraient pas se tendre correctement. L'artiste Christo avait la partie plus facile, car ses emballages d'édifices sont artistiquement drapés, ce qui est exclu dans le cas de Belval, et cela permettait à Christo d'employer une main d'œuvre peu qualifiée et peu chère. Le Fonds Belval a fini par repérer une firme anglaise qui disposait d'un personnel suffisant, et qualifié à la fois. Pour intégrer des Anglais dans le contexte de la législa-

tion du travail luxembourgeoise, point par point incompatible avec celle de la fière Albion, la tâche administrative fut délicate, autant pour les contrats de travail, que pour les assurances, les charges sociales, les horaires et heures de travail. Mais à force de créativité bureaucratique, on a conjugué l'inconjugable, et l'équipe anglaise a mis en place les grandes surfaces blanches qui allaient cacher les hauts fourneaux pendant un bon moment.

Ces bâches sont thermodurcissables, on l'a dit, ce qui veut dire que chauffées, elles changent de propriétés physiques : elles deviennent collantes et en même temps se contractent. Ces deux propriétés sont fort utiles : la première pour les faire adhérer à l'échafaudage en enroulant les extrémités autour des tubes d'acier, et la seconde pour que, une fois en place, elles se contractent comme une peau de chagrin, et se mettent sous une tension mécanique considérable. Ces effets s'obtiennent à l'aide des gaz chauds d'un chalumeau. Quand l'opération thermique est terminée, la tension est telle que l'on peut tambouriner la bâche comme un gigantesque diaphragme. C'est cette tension de la membrane qui garantit sa résistance au vent.

Le vent est d'ailleurs l'ennemi de tous les travaux à l'air libre. Un vent trop fort interfère avec le soudage, dévie l'arc électrique et perturbe la mise en place du laitier de soudage, avec comme effet une porosité inacceptable dans le cordon de soudure. Il gêne la mise en place des bâches et hâte leur dégradation. Il rend difficile la peinture au pistolet car il gêne la projection et disperse les gouttelettes à la ronde. Il fait osciller les charges suspendues aux filins des grues, et fait tanguer et chanceler les nacelles hydrauliques. Et il porte les bruits du chantier au loin.

L'impact sonore du chantier

Tout chantier génère des bruits de toutes sortes, mais celui de Belval a été particulier dans le sens qu'il nécessitait pendant une bonne partie de son existence l'emploi de techniques très bruyantes, en l'occurrence le nettoyage des surfaces par jets d'eau à haute pression d'eau, et par grenail-lage, et cela à proximité immédiate d'immeubles déjà habités. Anticipant le risque de nuisances, le Fonds Belval a commandé auprès de Luxcontrol une « Etude d'impact sonore ».

La question de fond était la suivante : étant donné l'étendue du chantier dans ses extensions en longueur, en largeur et en hauteur, étant donné les divers bâtiments faisant écran ou non, étant donné le planning général avec les différentes phases bruyantes pouvant se succéder ou au contraire se chevaucher et surajouter les sonorités, étant donné les outils généralement de bruit, étant donné l'existence d'un bâchage qui confine éventuellement le bruit, étant donné la température atmosphérique et l'humidité moyenne du site, qui favorisent ou défavorisent la propagation des sons,



IMMI 6.3.1a Plans et documentation photographique/Plans immi Chantier final/Plan immi initial - Ph2 final HFB.IPR

quel est le niveau de bruit que percevra l'oreille d'observateurs postés à divers endroits représentatifs, et est-ce que ces niveaux sont tolérables ou au contraire à proscrire dans le cadre de la législation existante (par exemple dans l'arrêté grand-ducal du 13 février 1979) ?

Luxcontrol a mené une étude exhaustive. Un premier pas a consisté dans la modélisation par ordinateur de la Terrasse des Hauts Fourneaux pour ce qui est de son comportement acoustique. Cette modélisation découpe la Terrasse en volumes géométriques avec lesquels les ondes sonores vont interagir, se réfléchir, être absorbées, ou amplifiées etc. Le modélisateur peut y introduire des sources de bruit ponctuelles, linéiques ou surfaciques. Dans ce but, Luxcontrol a effectué, ensemble avec la société Iris sur ses chantiers en Belgique, des mesures acoustiques d'engins de nettoyage semblables à ceux prévus pour Belval. Ces mesures de nettoyage à haute pression et de sablage se sont faites sur des surfaces de références en acier, similaires aux hauts fourneaux. Plusieurs questions importantes ont dû être abordées : les structures des hauts fourneaux vont-elles jouer le rôle de caisse de résonance et amplifier les nuisances sonores, ou au contraire, leur masse étouffera-t-elle lesdites résonances ? La réponse a été que les masses des hauts fourneaux ont des vibrations à très basse fréquence, loin des fréquences élevées du nettoyage et qu'il n'y aura donc pas d'effet amplificateur. Et comment estimer l'effet d'absorption des baches d'échafaudage intercalées entre les sources sonores et l'observateur ? A cet effet, Luxcontrol a procédé à des essais pratiques en tendant des surfaces de baches sur un cadre de laboratoire et en procédant à des mesures systématiques. Toutes ces informations ont été introduites dans le modèle mathématique. Des calculs estimatifs ont ainsi pu évaluer



l'impact du bruit, et cela pour les diverses phases de la restauration. On a pu déterminer ainsi l'épisode sonore le plus important, à savoir l'« heure la plus bruyante en période de jour ». L'étude a suggéré qu'il y aurait peu de plaintes, et en effet, celles-ci étaient fort rares.

8 Grenailage, minium, pénibilité

Les surfaces des éléments de structure qui supportent de lourdes charges, comme par exemple les poutrelles des tours carrées, ont été peintes, et non pas vernies. Cela signifie que l'aspect historique a été sacrifié au profit de la sécurité. Dans ce cas, l'application de la peinture a suivi la technique habituelle qui consiste à enlever toute rouille pour arriver jusqu'au métal nu. Cette opération s'appelle traditionnellement sablage, bien que l'utilisation du sable soit interdite par suite des dangers de silicose. De nos jours, on met en œuvre la procédure dite de grenailage, qui utilise non plus du sable, mais d'autres matériaux abrasifs. Dans le cas des hauts fourneaux, on a employé le produit « Abragrit », un silicate d'aluminium, à la granulométrie précise, dont les particules sont trop grosses pour passer dans les bronches et qui ne sont donc pas absorbées par l'organisme.

La société Iris avait essayé également le produit « Profilium », un abrasif à base de grenailles d'acier, utilisé principalement en atelier. Comme ces particules sont ferromagnétiques l'idée était de pouvoir les recycler en séparant par voie magnétique les billes d'acier des oxydes de fer, c'est-à-dire des résidus de rouille. Il s'est avéré cependant que les particules de Profilium rouillaient trop rapidement dans l'humidité du chantier.

Parmi les déchets qui polluent inévitablement l'Abragrit usagé se trouvent les débris de vieille peinture au minium, l'ancien pigment rougeâtre employé pendant des siècles. Il s'agit d'un tétroxyde de plomb Pb_3O_4 , doté d'excellentes propriétés anticorrosives et fongicides, mais sa toxicité est avérée. Son usage, antérieurement prescrit, est interdit de nos jours, le produit recouvre encore d'innombrables ouvrages âgés, comme par exemples les pylônes de haute tension âgés de plus de trente ans.

Les ouvriers du chantier de Belval ont été protégés, suivant les prescriptions en vigueur, contre le minium au moyen de combinaisons étanches. Ils ont passé également un check up médical deux ou trois fois par an, pour surveiller la concentration du plomb dans l'organisme.

Le travail de grenailage a été particulièrement pénible en été. L'opération s'est déroulée en dessous des bâches, pour confiner la poussière. Or, en plein soleil, les bâches font effet de serre, et la température y atteint facilement 40°C. A cet inconfort, il faut ajouter celui du port des combinaisons et des casques spéciaux destinés à protéger notamment les yeux du grit et les oreilles du sifflement infernal et continu des pistolets. Et malgré la pénibilité de ce travail, l'opérateur doit faire preuve d'une grande vigilance, car un jet de grit coupe un doigt en moins de rien.

L'Abragrit usagé, mélangé aux divers oxydes de métaux lourds, notamment le fer et le plomb, et dont la quantité se mesurait en plusieurs tonnes par jour, a été collecté et envoyé pour retraitement dans une firme qui s'était équipée spécialement pour gérer ces masses et volumes en flux continu.



Opérateur - sablage

9 Touches, prétouches et retouches

Tout chantier de peinture présente ses difficultés propres; parmi celles du chantier de Belval ont été les retouches et prétouches de peinture. De quoi s'agissait-il ? L'échafaudage compliqué au point de ressembler à un véritable labyrinthe en acier, a dû s'appuyer sur de très nombreux points de la structure des hauts fourneaux, et cela pour des raisons de statique, et de résistance au vent. Ces points d'appui, d'une surface d'un décimètre carré à peu près, ont été plus nombreux que dans le cas d'un ouvrage simplement vertical. Ils ont constitué autant d'endroits inaccessibles aux peintres. Il a fallu les peindre dans une seconde étape.

Une retouche, comme toute opération de peinture, se fait nécessairement en deux temps : une fois pour appliquer le primaire, une seconde fois pour la couche de finition. Lors du séchage, les autres corps de métier ne doivent pas procéder à des travaux qui génèrent de la poussière, sinon celle-ci reste collée et détériore la peinture.

En plus, lors de la saison froide, les opérateurs peuvent être surpris par des températures trop basses, qui peuvent empêcher la polymérisation des retouches. Pour y parer, le producteur de peintures a fourni une variante spéciale de primaire, plus coûteuse il est vrai, mais qui durcit encore à 0°C, et qui permet de mener à bien les travaux les plus pressants.

Lors de la planification, les responsables étaient conscients de l'inévitabilité des retouches, mais ils en avaient sous-estimé le nombre. En effet, il s'est avéré qu'une retouche a été générée tous les 2 ou 3 mètres carrés. Elles ne peuvent être traitées qu'à partir du moment où l'on commence



à démonter l'échafaudage, donc de haut en bas, à partir de l'étage le plus élevé. Deux équipes doivent alors travailler en un synchronisme parfait.

Théoriquement, on aurait pu procéder autrement, en installant un échafaudage avec des accrochages doubles, qui auraient permis d'enlever l'un pour peindre la retouche, quand l'autre restait en fonction et inversement. Mais les coûts d'un tel échafaudage auraient été prohibitifs.

Il s'est avéré aussi que l'on ne pouvait laisser un échafaudage trop longtemps en place contre le haut fourneau, du fait de la formation de coulures rougeâtres bien visibles en provenance du point d'ancrage, et qui se seraient étalés sur les parties déjà peintes.

Par ailleurs, retoucher une surface comporte toujours le risque de voir apparaître des différences de teintes à l'endroit reconditionné. Dans l'histoire de l'art, un tel phénomène était le cauchemar permanent des anciens peintres de fresques, qui redoutaient le liseré entre la peinture de la veille et celle du matin suivant.

Sur les surfaces vernies, le souci des retouches était moindre que sur les surfaces peintes, car les aires vernies laissaient de toute façon transparaître à dessein la surface irrégulière, donc « historique » de la surface métallique, et la retouche n'y paraissait guère.

D'autres retouches étaient dues aux travaux de soudage. Les contraintes d'un chantier impliquent des fois qu'il faut faire des soudures à des endroits déjà peints. Les jets d'étincelles



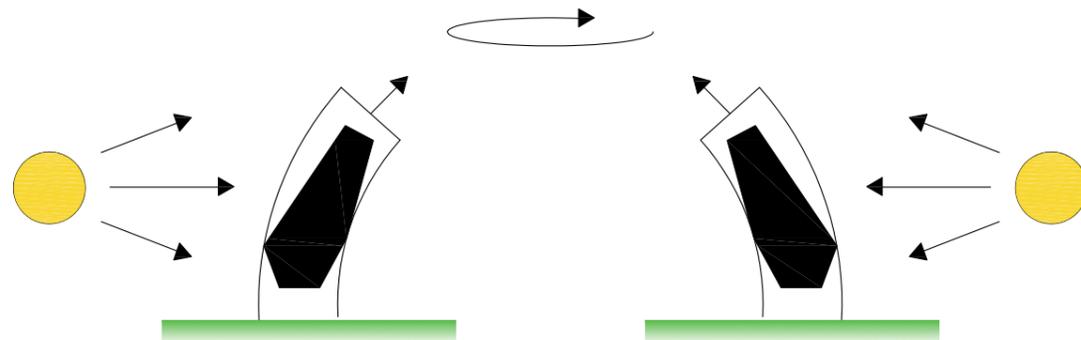
Retouche sur monte-charge du Haut Fourneau B

brûlent et abîment la peinture, ce qui entraîne également des réparations. La surface réduite des retouches interdit le recours à la technique du grenailage, il faut se résoudre au ponçage manuel, une opération onéreuse en heures de travail.

A côté des retouches, il faut encore mentionner les prétouches. Sur des surfaces anguleuses, tel une arête de poutrelle, la tension superficielle chasse souvent la peinture. A l'endroit de l'arête on risque d'avoir une épaisseur de peinture plus faible, donc plus exposée à la corrosion. On contre cet effet en appliquant au préalable une 'prétouche', c'est-à-dire une première couche de peinture que l'on laisse sécher avant l'application de la couche définitive. Il est évident que le chantier de Belval a comporté un vrai foisonnement de surfaces à prétouches.

10 Masticage, l'opération invisible

Exposée aux variations climatiques, la structure des hauts fourneaux, comme d'ailleurs celle de tout ouvrage en acier, n'est jamais véritablement au repos. L'acier se dilate et se contracte au fil des changements de température et de l'ensoleillement. Ce mouvement, imperceptible à l'œil nu, peut prendre des aspects surprenants, comme le montrent les deux schémas suivants



Distorsions par dilation thermique d'un haut fourneau, sous l'effet du réchauffement solaire. Les distorsions sont fortement agrandies pour les rendre visibles. Les lignes incurvées représentent la tour carrée déformée, les doubles trapèzes noirs les blindages. A gauche : lever du soleil, à droite : coucher.

Le dessin de gauche montre le soleil levant qui réchauffe le flanc du haut fourneau qui lui fait face, le côté opposé restant dans l'ombre. Le flanc exposé se dilate, avec un coefficient de 12×10^{-6} m/degré pour l'acier. En clair, ce coefficient de dilatation signifie que pour une augmentation de la

température de 1 degré Celsius, une tige d'acier de 1 mètre s'allonge de 12 millièmes de mètre). A priori, ceci peut paraître négligeable, mais dans le cas de grands objets comme les hauts fourneaux, le calcul montre que leur structure se déforme de plusieurs millimètres lors d'une augmentation de la température de seulement 5°C. L'énergie nécessaire pour déformer une affaire aussi massive qu'un haut fourneau est celle apportée par le réchauffement solaire.

Le jour avançant, la terre continue à tourner et le trajet apparent du soleil fait se dilater les parties successives de la structure. Le soir, le haut fourneau se penche du côté opposé à celui du matin, comme le montre le schéma de droite. Sur la journée, le sommet du haut fourneau décrit ainsi une partie d'un petit arc de cercle, comparable au pourtour d'un dé à coudre. Cette considération sur le mouvement diurne des hauts fourneaux, n'est pas qu'académique. Pour tenu qu'il soit, il contribue à divers mécanismes corrosifs délétères. On n'a qu'à penser aux interstices entre deux poutrelles jointives, ou encore aux multiples couvercles et trous d'homme peu étanches, de même qu'aux joints d'assemblage de toutes sortes. Ces interstices s'ouvrent et se ferment au gré des mouvements thermiques précités, permettant à l'humidité de s'infiltrer – qui peut geler et se dilater sous forme de glace – ou aux poussières et agents nocifs, comme les chlorures et sulfates de s'y fixer, et de constituer des foyers de corrosion permanents et quasi inaccessibles.

Pour restaurer convenablement les hauts fourneaux, et pour éviter que dans tout interstice il ne se trouve un cheval de Troie de la corrosion, il était impératif de fermer ces joints de façon étanche. Ce travail était bénédictin, car il fallait s'occuper d'innombrables joints, dont la longueur totale s'évaluait en centaines de mètres, et qu'il a fallu traiter manuellement, parcourant centimètre par centimètre. Il fallait employer des mastics de bonne qualité, bien élastiques, et qui allaient garder leur élasticité même par grands froids, et sur le long terme. Les mastics utilisés étaient de type polyuréthane monocomposante. Les surfaces métalliques adjacentes aux joints étaient nettoyées au préalable par grenailage.

11 Teintes, coloris et illumination

Il faut bien distinguer peinture d'un côté et teinte ou coloris de l'autre. Sous peinture, on entend la composition chimique des diverses couches, telles polyuréthanes, polysiloxanes, époxy etc. La teinte par contre est apportée par les pigments colorés qui sont ajoutés à la peinture, bref, c'est la couleur sous laquelle paraît l'objet. Rappelons que les teintes s'appliquent aux systèmes à structures portantes, enduites d'un système complet de peintures, et non pas aux vernis. Le choix de la peinture ayant été arrêté à la mi-2008, il fallait ensuite songer à déterminer les teintes. Or, les teintes

sont fonction de l'éclairage, naturel ou artificiel, et le choix de l'éclairage doit se faire conjointement.

L'éclairage des espaces a une incidence sur l'ambiance générale du site de Belval, notamment sur l'espace particulier où les vestiges industriels côtoient les nouveaux immeubles de la Cité des Sciences. L'espace des hauts fourneaux étant complexe, à perspectives multiples, on ne pouvait espérer réaliser un éclairage satisfaisant qu'en procédant à des essais grandeur nature, sur le site même. En désignant Ingo Maurer, architecte-designer de Munich, comme maître à penser de l'éclairage et de l'illumination, le Fonds Belval s'est adjoint un des meilleurs concepteurs artistiques dans ce domaine.

La mise en scène lumineuse des monuments, réalisée par Ingo Maurer et son équipe, a été présentée au public en octobre 2008. En jouant avec la disposition des phares et l'alternance des rythmes d'éclairage, l'équipe Maurer a su tirer suffisamment d'enseignements et d'inspirations pour un plan d'éclairage et de coloris définitifs.

La présentation des essais d'octobre avait été précédée d'une série de conférences destinées à introduire le public dans la matière. Quand la lumière du jour eut suffisamment baissé et que les silhouettes des hauts fourneaux se fondaient dans le ciel nocturne, la mise en scène de l'éclairage débuta par une tonitruante explosion de sons, véritables coups de tonnerre, tirés de « Sketches of Spain » de Miles Davis. Réglés comme dans un ballet, les projecteurs entamèrent leur danse, pivotaient et balayaient les surfaces, pendant que la musique en martelait les mouvements. A la fin du spectacle, qui a duré deux heures, il était évident que la lumière blanche utilisée par Maurer, était un choix heureux, et la suite a confirmé ce choix.

Si les feux industriels se sont éteints le 31 août 1997, jour de la dernière coulée de fonte, d'autres feux se seront allumés ce 10 octobre 2008, inaugurant le nouvel avenir du site.

Le concept de Maurer se démarque clairement de celui des autres sites, tels Völklingen, Duisburg ou encore Uckange, et cela essentiellement par l'emploi de lumière blanche, qui met en valeur les couleurs du substrat historique, sans en altérer les nuances.

L'ensemble du système d'éclairage nécessitait d'importants travaux préparatoires : l'équipe de Maurer a travaillé plusieurs jours à la mise en place des équipements électriques, câblage, projecteurs, phares. C'était devant la maquette construite par son équipe, de 2 mètres carrés, éclairée de lampes miniatures, et ayant servi de laboratoire, que Ingo Maurer a exposé ses idées :



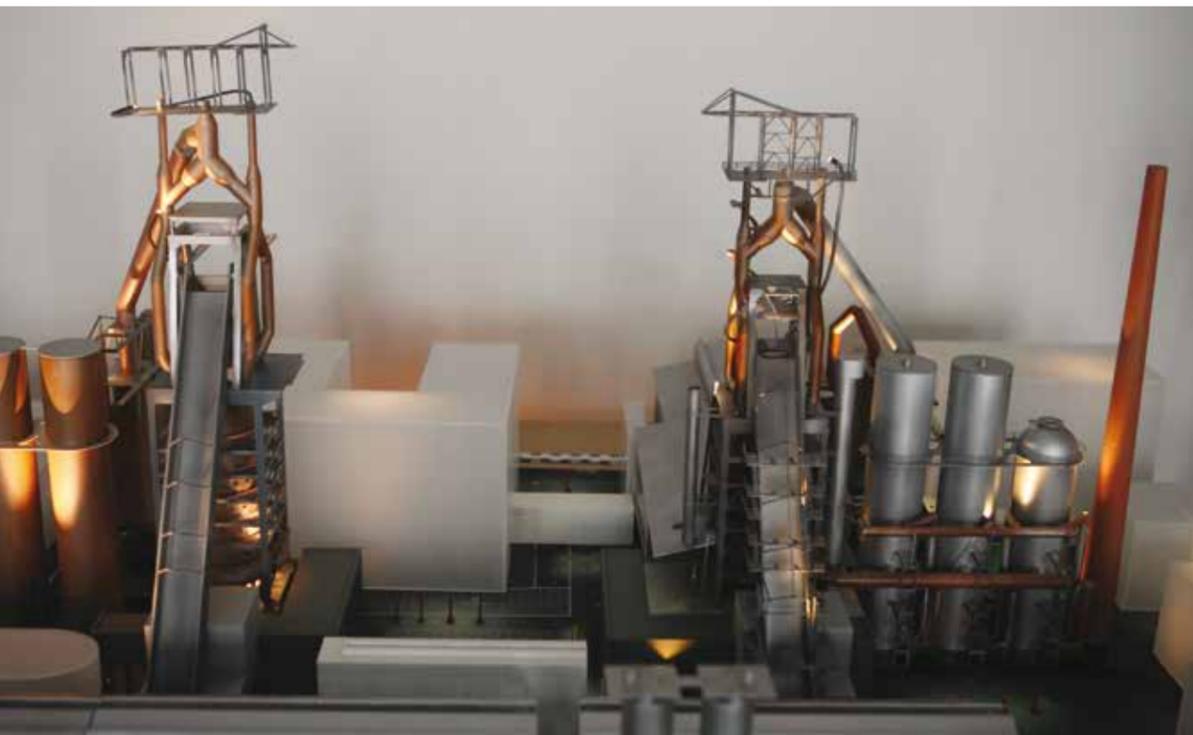
Essai d'illumination nocturne des hauts fourneaux à la lumière blanche. Ces essais, conçus par Ingo Maurer et son équipe, se sont déroulés en octobre 2008.

« Mon but est de capter l'esprit de ce lieu remarquable. Je veux préserver la mémoire de ceux qui y ont œuvré sur plus d'un siècle. A l'inverse de l'illumination souvent trop haute en couleur de certains monuments, je préfère travailler avec la lumière blanche, qui n'altère pas les teintes, afin de créer un jeu de contrastes entre les vides et les pleins, entre le clair et l'obscur. J'ai pensé aux films en noir et blanc des années vingt du 20^e siècle, à l'esthétique d'Eisenstein ou de Murnau, ou encore à la représentation de l'homme dans l'univers industriel, comme dans *Métropolis* de Fritz Lang. »

Polychromie ou monochromie ?

Il existe différents systèmes de classification des couleurs. Le plus connu est le système RAL, qui attribue un numéro internationalement reconnu aux couleurs industrielles.

Le choix des couleurs pour les grands ouvrages d'art n'est jamais une opération anodine, car ces choix ont le don de polariser l'opinion publique. Un cas historique avait été le cas du Golden Gate Bridge, à savoir le choix par l'architecte consultant Irving Morrow d'un ton appelé International Orange. Il y eut une opposition vive à cette proposition, mais elle fut maintenue,



Maquette des Hauts Fourneaux illuminés par Ingo Maurer

et depuis, tout le monde s'accorde à dire que le choix a été heureux. Au Luxembourg, il y eut une controverse similaire, quand le pont Grande-Duchesse Charlotte fut peint en rouge. Quelques professeurs de l'Athénée, dont un des professeurs de l'auteur de ces lignes, jouaient avec l'idée d'aller saboter symboliquement les opérations de mise en peinture. Mais il n'en fut rien, et les citoyens d'aujourd'hui auraient de la peine à s'imaginer ce pont autrement qu'en rouge.

Pour les Hauts Fourneaux de Belval – monuments dans la cité – le choix des coloris n'a pas été banal non plus, par suite des grandes surfaces visibles en pleine ville.

Les teintes doivent se conjuguer avec la patine historique des surfaces voisines, de même qu'avec la ville nouvelle, qui s'est donné son propre choix de couleurs.

L'éclairage des hauts fourneaux provient de deux sources lumineuses aux caractéristiques spectrales très différentes : le jour par la lumière naturelle, la nuit par la lumière artificielle. Les couleurs retenues doivent ressortir convenablement dans toutes les conditions d'éclairage.

Une première proposition de Maurer s'était résumée ainsi :

La coloration des hauts fourneaux pourrait reposer sur les 6 tons suivants : RAL 7012, 7042 et 7043, ensemble avec Design RAL 5000, -040 30 30 et -040 40 30.

Ces propositions furent testées une première fois sur la maquette déjà citée. Pour un essai en grandeur nature, le Fonds Belval avait profité de l'accalmie sur le chantier au cours du mois d'août 2009, pour appliquer sur des



Essai peinture de teintes gris

surfaces d'essai les 6 coloris proposés. L'endroit choisi a été le monte-charge, entre le Haut Fourneau B et la Möllerei.

Ces essais n'ont pas donné satisfaction. En début 2010, Maurer a refait un essai avec une seule couleur, un gris neutre. C'était dans son esprit le bon choix, et en aout 2010, il a remplacé les teintes de sa proposition polychrome initiale par le seul RAL Design 000 3000. Le retour vers un sobre monochrome se comprend mieux si l'on se rend compte que de toute façon, la chaudronnerie toute entière sera enduite d'un vernis transparent qui garde dans leur quasi intégralité les couleurs historiques multiples. Ajouter à cette multiplicité naturelle une multiplicité factice aurait risqué de surcharger l'aspect visuel. La sagesse a dicté la sobriété.

En résumé, les parties de structure portante, telles les tours carrées, portent maintenant une teinte unique grise et encadrent ainsi de façon neutre la diversité chromatique de la chaudronnerie vernie.

Des parties de texte de ce chapitre sont repris du Magazine n°4, 2008

12 Restauration des « downcomers »

Les downcomers constituent des parties très visibles et caractéristiques des silhouettes des deux hauts fourneaux. Un downcomer est un gros gazoduc, d'un diamètre de plus d'un mètre et incliné à plus de 45°. Les gaz chauds provenant de la combustion du coke sont captés par quatre



Essai peinture de teintes rouge

tuyaux verticaux, qui partent verticalement des quatre 'coins' de l'étage gueulard, qui se réunissent en un seul, lequel fait angle pour descendre : c'est le downcomer. Ce dernier conduit les gaz, sur une longueur de trente mètres, vers le système d'épuration qui les débarrasse de leur charge de poussière. Le downcomer est en acier de construction, soudé et à paroi épaisse – car il est autoportant sur toute sa longueur. Son intérieur est garni de réfractaires dans sa partie la plus élevée, celle qui est la plus chaude. L'impact visuel de ces grosses conduites étant fort important, le Fonds Belval a décidé d'employer à cet endroit, non pas la peinture, utilisée pour les structures portantes, mais le vernis qui laisse transparaître l'aspect original.

La configuration particulière des downcomers A et B n'a pas permis d'utiliser le type habituel d'échafaudage ; le problème fut résolu par une cabine mobile, faite sur mesure à partir de cornières en acier. Pour cette raison, il n'a pas été possible d'isoler ce chantier aérien au moyen d'une bâche, comme on l'a fait partout ailleurs. Cette contrainte a impliqué que toutes les opérations de restauration ont dû s'effectuer à la main. Les surfaces

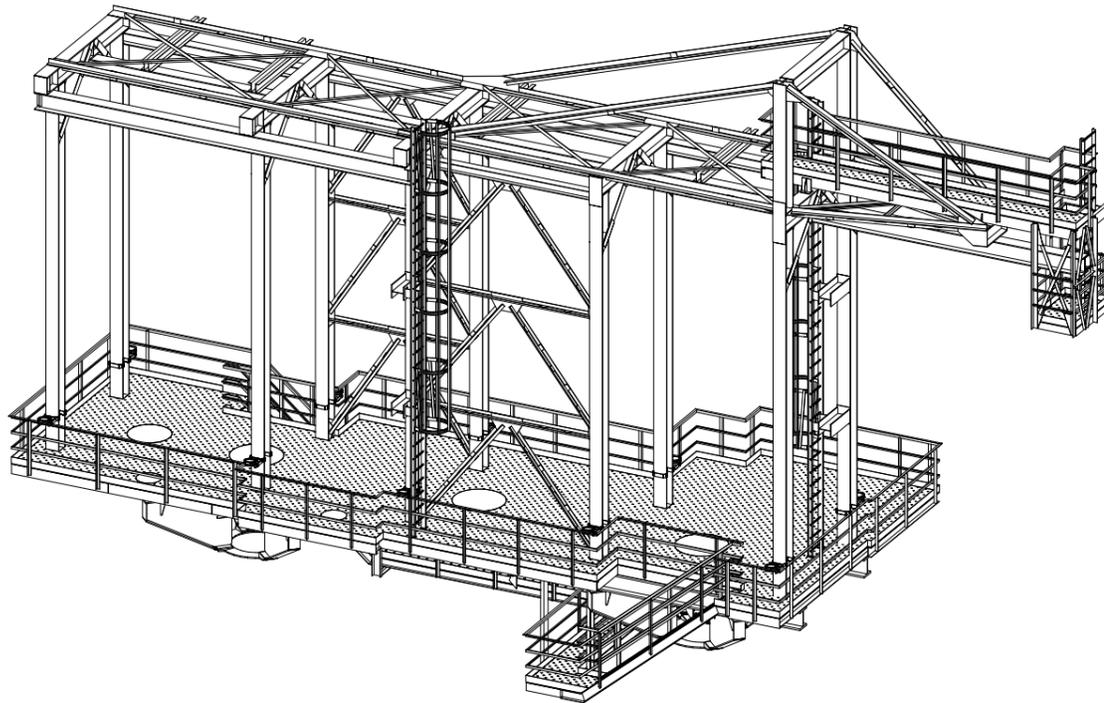


Nouvelle charpente du bleeders du Haut Fourneau B

ont donc été lavées, nettoyées, débarrassées de la rouille manuellement ou avec un marteau à aiguilles, et enfin revêtues à la brosse. Le vernis a consisté en une double couche de clear coat et de sealant, d'une épaisseur de $50 \mu + 100 \mu = 150$ micromètres.

13 Restauration des 'bleeders'

La partie la plus élevée d'un haut fourneau, sa couronne, celle que l'on voit de loin, est un signe doublement distinctif ; un marqueur de l'époque de construction et une signature du constructeur. C'est en tout cas un calligrama que le spécialiste décrypte du premier coup d'œil. La restauration de cet élément s'est donc imposée impérieusement.



Axonométrie de la charpente du bleeders du Haut Fourneau A

Il est bon de rappeler qu'un haut fourneau est un gros récipient sous pression, exposé en permanence au risque d'explosions. Pour cette raison il est équipé, en haut de sa structure, de clapets d'explosion appelés « bleeders ». To bleed, verbe anglais qui renseigne sur le pays d'origine de l'invention, est à traduire ici par : purger, vidanger, soutirer. Historiquement, ces clapets d'explosion se sont imposés quand les constructeurs ont fermé le gueulard à l'aide de cloches. En cas de surpression les bleeders étaient censés s'ouvrir quasi-instantanément, en général par action hydraulique, pour baisser la pression et éviter des fissures dans le corps du haut fourneau. Un gros ressort maintenait les clapets en position fermée. En cas de problème, l'ouverture des différents clapets était réglée en cascade, suivant la dangerosité de la montée en pression des gaz

Les bleeders sont des mécaniques impressionnantes par leur volume, constituées de gros tambours de 900 mm de diamètre, insérées dans la charpente de la plateforme d'entretien, située à 80 mètres de hauteur. Leur partie inférieure communique avec les quatre conduites à gaz qui sortent du haut du blindage. Dans le présent cas, il s'agit d'une plateforme Paul Wurth caractéristique, qui permet l'accès aux clapets via un escalier en colimaçon, et qui est équipée d'une grue de levage latérale pour les travaux d'entretien.

La restauration des plateformes a suivi deux voies différentes, du fait de l'asymétrie de la corrosion des deux hauts fourneaux. En effet, le B se trouve sous les vents dominants d'ouest, et était ainsi exposé aux émanations sulfureuses du bassin à laitier, situé entre les deux hauts fourneaux. La corrosion s'accroît de façon générale avec la hauteur du fait que la vitesse du vent et l'impact de la pluie et de la grêle augmentent avec le carré de l'élévation. A la hauteur de la plateforme, la vitesse du vent est au moins le double de celle au sol. Ces phénomènes ont eu comme résultat que le sommet du B était de loin la partie la plus corrodée du chantier.

La plateforme du B

Comme préalable à la restauration des plateformes, un diagnostic avait été établi, par la société Paul Wurth. Cette étude détaillée des éléments de l'ossature, accompagnée de tests de la résistance des matériaux subsistants, ainsi que des mesures d'épaisseur des peintures, avait été exécutée à 80 mètres de haut. Elle a révélé que la partie est de la charpente était dangereusement corrodée : par endroit l'âme des profilés était trouée et l'épais-



Les bleeders dans leur état corrodé, démontés en 2008-2009 et entreposés temporairement au niveau du plancher de coulée. Ici, ils sont détachés et séparés de leur plateforme de support.

seur des ailes réduite à un tiers. Certains éléments n'étaient plus qu'une masse friable. Les pieds de la plupart des portiques, avec leurs raidisseurs, nervures, profilés et boulons ont tous montré un état de corrosion avancée. L'étude concluait que plus d'un tiers de ces profilés était à remplacer pour garantir la stabilité à long terme.

La restauration s'étant avérée impossible à effectuer en altitude, la structure fut démontée, et descendue au sol.

Cependant, l'examen plus détaillé effectué au niveau du sol a vite montré que la détérioration de la structure portante était si avancée qu'il n'était plus possible de la restaurer économiquement et qu'il fallait la remplacer par une structure neuve, ou réplique. Heureusement, il était possible de

recupérer les éléments principaux de cet ensemble, à savoir les vannes et clapets d'explosion. Ce travail de reconstruction a été confié à la société Arendt, qui à cette occasion a procédé à la première mise en œuvre des peintures polysiloxanes qui venaient d'être sélectionnées pour l'ensemble du chantier.

La plateforme du A

L'examen de la plateforme du Haut Fourneau A a montré qu'en dépit des dégâts de corrosion, celle-ci était encore restaurable, pour les raisons évoquées ci-dessus.

Cependant, on ne pouvait pas non plus la restaurer en hauteur, car il aurait fallu laisser en place les grands échafaudages. Le démontage de ces derniers était cependant indispensable, car il fallait terminer les travaux de retouches, pour ne pas se trouver pénalisé par la mauvaise saison qui approchait. On était donc obligés d'enlever la plateforme A et de la transporter en pièces détachées à l'atelier, ou la restauration s'est faite au cours de l'hiver 2012.

Donc, contrairement à la couronne du B, une copie d'ancien, celle du A est restée l'originale.

14 Restauration de la grande cheminée

La grande cheminée en briques qui jouxte le Haut Fourneau A constitue un élément bien visible, et à ce titre, elle a été restaurée avec soin. Les circonstances ont été plus clémentes



La couronne du Haut Fourneau B en voie de démontage en 2008. .



à son égard qu'envers les deux autres cheminées en briques, celle de l'ancienne agglomération, distantes d'environ un kilomètre, que l'on a coupées à la moitié de leur hauteur, pour les stabiliser.

La cheminée d'un haut fourneau constitue le terminus du long parcours du 'vent', comme on appelle l'air de combustion dans le jargon. Le départ du parcours se situe dans le hall des soufflantes.

Evoquons à cet endroit un bilan matière simplifié des hauts fourneaux : pour entretenir la combustion du coke, il fallait d'énormes masses d'air pour fournir l'indispensable oxygène : à la sortie des cheminées, le flux d'air complété par le CO² du processus, pèse plus que la fonte produite



Restauration de la cheminée du haut fourneau A en 2009

par son action. Le non spécialiste a quelque peine à le comprendre, car l'air semble sans masse ni poids, alors que peu de choses semblent plus pondéreuses que la fonte.

Ces quantités d'air, générées au niveau du hall des soufflantes, passant à travers les cowpers, puis à travers le haut fourneau où elles s'appauvrissent en oxygène et se chargent en monoxyde de carbone, sont ensuite débarassées des poussières polluantes dans les épurateurs, retraversent les cowpers en sens inverse, où la combustion transforme le monoxyde (CO) en dioxyde carbone (CO²), pour récupérer les calories générées par cette oxydation, et enfin, dernière étape, elles entrent dans le bas de la cheminée, s'élèvent en hauteur, et émergent enfin dans l'atmosphère.

La cheminée est le symbole, visible de loin, de l'industrie lourde en général, de la sidérurgie en particulier. C'était l'icône du 19^e siècle, et des trois quarts du 20^e siècle, avant que la deuxième Révolution industrielle ne déplaçât les emblèmes de l'activité humaine ailleurs.

La cheminée, avec ses 75 mètres, est un peu moins haute que le haut fourneau avec 86 mètres. Sa forme est élancée, et son diamètre passe de 6 mètres à la base, à 3 mètres au sommet, une forme tronconique faite pour résister aux forces du vent. Son malheur a été d'avoir été construite en briques de médiocre qualité. Elles ont résisté aux agressions tant qu'elles étaient tenues chaudes, c'est-à-dire pendant la vie active des hauts fourneaux, mais dès l'arrêt en 1997, froides et poreuses, elles sont restées sans défense vis-à-vis des intempéries et notamment du gel. Dans les années consécutives à l'arrêt, leur déclin a progressé à une vitesse croissante. Sous l'action du cycle gel-dégel, elles se sont désagrégées. Le sol autour de la cheminée était jonché d'amas de céramique rouge.

Pourquoi ce déclin est-il survenu si rapidement, puisque des ouvrages en briques sont conservés, depuis des temps très reculés. Il n'y a qu'à citer des ouvrages romains en brique, ou les cathédrales de style Backsteingothik en Allemagne du Nord, debout depuis un demi millénaire, et cela dans un climat au moins aussi ingrat que celui de Belval. L'état délabré des briques de Belval s'explique avant tout par leur mauvais frittage, et par une cuisson abrégée. Une brique de cathédrale était si bien frittée qu'elle était quasi vitrifiée et scellée vis-à-vis de l'humidité. Celles de la cheminée étaient poreuses comme un pot de fleur, pour la simple raison que les maîtres des forges, des gens économes, n'avaient pas anticipé une longévité particulière, et se sont contentés d'acheter les briques les moins chères pour une durabilité limitée dans le temps.

Pour les « monuments dans la cité », on avait le choix soit de démolir la cheminée, soit de la scalper, comme Agora l'a fait avec celles de l'agglomération, soit de la restaurer avec minutie.



Début 2009, le Fonds Belval s'était décidé pour la troisième option, et cela pour des raisons historiques et esthétiques. Les travaux de restauration s'effectuaient à partir d'une plateforme annulaire mobile, embrassant la tour et passant de haut en bas des 86 mètres. Ce curieux chantier en ascenseur s'est ouvert en avril 2009, pour se terminer en septembre 2011, donc sur deux ans, les mois d'hiver ne comptant pas. Toutes les parties défectueuses ou manquantes ont été remplacées une à une par des briques de bonne qualité, - un véritable travail de bénédictin. Le tiers supérieur de la cheminée, le plus exposé, et avec la paroi la plus mince, s'est révélé si endommagé qu'il a fallu le reconstruire complètement. Chemin faisant, on a pu observer que le ciment de jointoiment se trouvait dans un état de porosité aussi déplorable que les briques qu'il était censé lier. Les cerclages d'acier ont été restaurés par des bandes en acier galvanisé. L'ouverture supérieure de la cheminée fut définitivement scellée, et quelques trous d'aération latéraux ont été aménagés. Le canal souterrain qui jadis évacuait le vent des cowpers dans la cave de la cheminée subsiste.

15 Rivetage, boulonnage, soudage

Les méthodes d'assemblage des Hauts Fourneaux de Belval sont caractéristiques des années 1960, une époque de transition entre la technique du rivetage et celle du soudage et du boulonnage.

Le rivetage était la première technique d'assemblage d'éléments en acier de l'ère industrielle. Les ouvrages et machines du 19^e et du début du 20^e siècle, les locomotives, les paquebots, les réservoirs à gaz, les ouvrages métalliques comme la tour Eiffel et les châssis automobiles étaient invariablement rivetés. La tour Eiffel comporte 2,5 millions de rivets. A cette époque, les boulons normés existaient déjà, mais non pas ceux en acier à haute limite d'élasticité. Il en allait de même avec le soudage industriel qui n'a démarré qu'avec la construction de Liberty Ships dans les chantiers navals américains des dernières années de la Seconde Guerre.

La technique du rivetage était relativement simple : pour assembler deux pièces en acier, on commençait par les perforer en un nombre d'endroits. On superposait les parties pré-perforées et on enfilait dans ces trous les rivets portés à l'incandescence. Par un choc mécanique, à l'aide d'un marteau lourd, on aplatissait le bout, comme le montre le schéma suivant :

Le rivetage permettait également d'assembler des pièces en acier de façon étanche. En effet, quand le rivet refroidissait, il se contractait et comprimait fortement les deux pièces. C'est cette compression qui assurait l'essentiel de la cohésion des deux pièces. La tige du rivet refroidie n'était plus

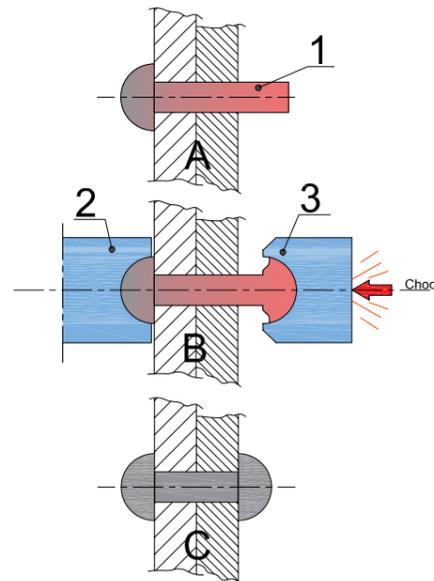


Schéma de la technique de rivetage. Source: wikipédia.

en contact avec les deux pièces : il se formait un espace annulaire vide autour de la tige. Ce jeu permettait de détecter facilement les rivets mal mis.

Un témoignage pittoresque de cette façon de faire est rapporté par un témoin oculaire du chantier de l'Empire State Building, construit à Manhattan entre 1930 et 1931, et riveté de haut en bas :

« Il était vraiment fascinant d'observer les riveteurs. Ils travaillaient par équipes de quatre : le chauffeur (the heater), l'attrapeur (the catcher), le riveteur proprement dit, (the bucker-up), et l'homme au marteau pneumatique (the gunman). Le chauffeur plaça une dizaine de rivets dans le braséro. Quand ils furent chauffés au rouge, il prit des tenailles longues

d'un mètre, saisit un des rivets, et le lança, suivant le cas sur une distance de 20 à 25 mètres en direction de l'attrapeur. Celui-là tenait dans une main un vieux bidon de peinture, ou un réceptacle plus élaboré, et attrapa au vol la pièce incandescente. De l'autre main, il agrippait des tenailles pour se saisir du rivet. Sans perdre de temps, il le prit et le frappa vigoureusement contre une pièce métallique pour faire éclater la calamine, puis l'inséra dans le trou pré-foré. Le troisième homme entra en action et pesa avec son outil contre la tête du rivet, pendant que le quatrième, le marteleur, se mit à frapper le bout du rivet pour l'aplatir en champignon. L'équipe travaillait ainsi, pendant des semaines, du premier étage jusqu'au 102e, c'est à dire sur une hauteur de trois cents cinquante mètres ».

Source: John Tauranac, The Empire State Building: The Making of a Landmark(NY., 1995).

Une équipe travaillait à un rythme d'un rivet par minute, comme le documentent les films tournés lors de la construction du Golden Gate Bridge. Plusieurs séquences montrent le fameux lancement des rivets incandescents.

Aux USA, le dernier rivet d'un chantier, symbole de l'ouvrage achevé, s'appelait le Golden Rivet. Dans le cas du pont suspendu de San Francisco, l'honneur de le placer a échoué à l'ouvrier qui en avait également placé le premier, un énergumène au sobriquet révélateur de 'Iron Horse' Stanley. Mais le rivetage n'était pas la panacée de l'assemblage d'ouvrages en



acier. Le Titanic a sombré, parce que le fatidique iceberg, en frôlant la coque, avait décapité les rivets, sur des dizaines de mètres ce qui a fait bailler les tôles le long de la moitié des compartiments d'étanchéité.

Avec le temps, la technique du rivetage a perdu son attrait, pour plusieurs raisons: comme il fallait chauffer les rivets, on s'interdisait le traitement thermique de l'acier, donc son durcissement. En d'autres termes, ces températures élevées rendaient impossible l'emploi d'aciers de trempe à haute limite d'élasticité. L'acier des rivets étant par nature plutôt mou, les rivets devaient obligatoirement se mettre en grand nombre.

La deuxième raison du déclin a résidé dans le coût de la main d'œuvre. Tant que celle-ci était peu chère, le rivetage était la technique de choix. Mais avec les coûts sociaux croissants, il devenait de plus en plus difficile de justifier une équipe composée toujours de quatre personnes. Les boulons de précision, dont la technologie de production avait fait de grands progrès dans l'après-guerre, ont résolu ces difficultés: ils s'employaient

à froid et permettaient l'utilisation d'aciers à haute résistance. Au mètre courant, il fallait moins de boulons que de rivets. Un seul ouvrier ou deux suffisaient pour ce travail.

Le troisième désavantage du rivetage a mené au développement du soudage. Le rivetage est peu efficient en termes de quantité de matière. Pour riveter, il faut nécessairement superposer deux épaisseurs d'acier, qui est une véritable perte de matière, qui ajoute du poids à l'ouvrage et qui augmente, dans le cas des navires, la résistance hydrodynamique. Le soudage permet d'éviter tous ces désavantages. Dans le cas du Golden Gate Bridge, les anciens rivets corrodés sont progressivement remplacés par des boulons d'acier à haute résistance.

Si les Hauts Fourneaux de Belval avaient été construits quelques décennies plus tôt, ils auraient comporté des rivets exclusivement, mais dans les années 1960, le rivetage a été progressivement remplacé, on l'a dit plus haut, par le boulonnage et le soudage, notamment le soudage oxyacétylénique.

Cette transition se montre dans le fait que le Haut Fourneau A, le plus ancien des deux, comporte un nombre de rivets plus élevé que son congénère plus jeune.

On peut alors se poser la question pourquoi le rivetage n'a pas été remplacé du jour au lendemain par les nouvelles techniques. La réponse réside dans la prudence des constructeurs : dans une grande construction métallique, les points les plus critiques ont été ceux exposés aux vibrations, et à ces endroits névralgiques, qui n'étaient pas rares dans un haut fourneau, on a continué pendant tout un temps à privilégier la technique ancestrale et éprouvée.

Si le rivetage a disparu de nos jours dans les ouvrages en acier, il a cependant bien survécu dans d'autres domaines, notamment dans l'aviation.

16 La comparaison avec la Tour Eiffel

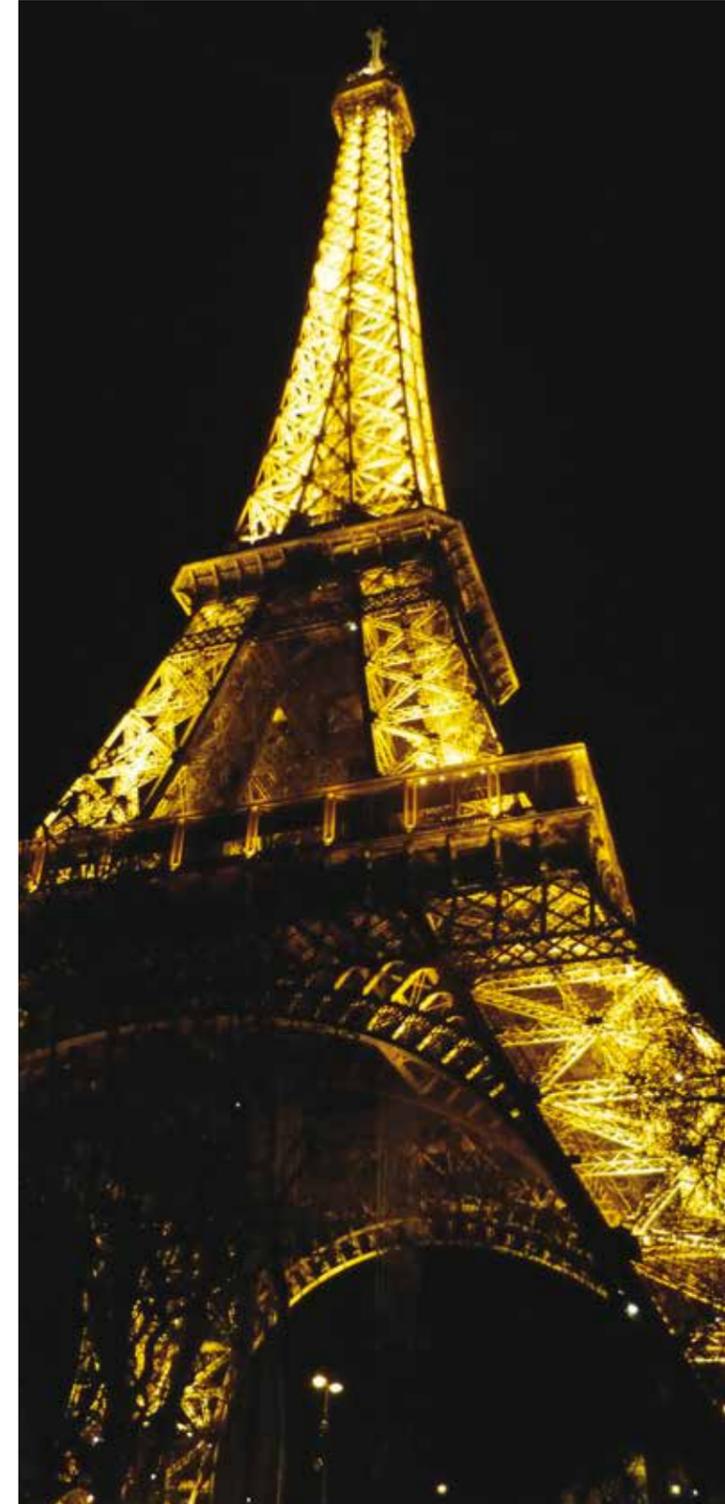
Comme la Tour Eiffel, les Hauts Fourneaux de Belval sont des architectures imposantes qui signifient au visiteur qu'il est arrivé, qu'il est au centre des choses.

Au niveau de leur conservation, les deux ouvrages si dissemblables par ailleurs comportent des similitudes qu'il est intéressant de relever. Les constructions de Belval, tout comme la tour qui domine le Champ de Mars ont en commun leur matériau constituant, l'acier, un métal en lui-même instable par rapport aux agressions de l'atmosphère, et qu'on ne peut conserver sur le long terme qu'en le préservant de la corrosion par des méthodes appropriées. Aucun des deux ouvrages n'est galvanisé, c'est-à-dire protégé par une couche de zinc, alors qu'on aurait pu croire que cette technique de protec-

tion, de loin la meilleure pour l'acier, se serait imposée d'elle-même. Mais la tour Eiffel était considérée pendant longtemps comme provisoire. Ce n'est que par son succès qu'elle est devenue pérenne. Au moment de sa mise en chantier, on a dû considérer la galvanisation comme une dépense élevée et superflue, même si en 1889, cette technique était bien connue, car elle a été inventée à Paris même, en 1836, un demi-siècle plus tôt, par l'ingénieur français Stanislas Sorel.

Quant aux hauts fourneaux, on ne s'est jamais donné la peine de les galvaniser, car leurs concepteurs étaient d'avis, non sans raison, qu'au vu de leur durée de vie limitée par les avancées rapides de la technologie, une simple couche de peinture ou de primaire suffisait à leur protection. Sur les parties très chaudes, le zinc aurait d'ailleurs été plus nuisible qu'utile.

Mais au-delà de ces traits communs, les différences sont profondes. La tour Eiffel est constituée dans son intégralité d'un seul et même type d'acier, plus précisément de ce qu'on appelait à l'époque 'fer puddlé', un procédé inventé en Angleterre à la fin du 18^e siècle par Henri Cort. Le puddlage a été progressivement remplacé à partir du milieu du 19^e siècle par le processus bien connu d'affinage à la cornue, inventé par Henry Bessemer et adapté à la fonte phosphoreuse par Sidney Gilchrist Thomas, tous les deux ingénieurs anglais. Au Luxembourg, les deux processus, le four à puddler et la cornue de Thomas, ont coexisté pendant quelques années, à la fin du 19^e siècle. Les premières cornues avaient été instal-



lées vers 1880 dans les halls de la première sidérurgie intégrée, celle de Dudelange. Les fours de puddlage par contre n'ont connu qu'une existence éphémère, du fait de leur productivité faible. Quelques unités de puddlage étaient installées dans les Aciéries de Hollerich (dont témoigne encore la rue de l'Aciérie). Le fer pour la tour Eiffel fut puddlé dans les aciéries de Pompey, près de Nancy. Les pièces brutes, acheminées dans les ateliers de Gustave Eiffel à Levallois, y furent enduites d'une couche de peinture avant montage.

L'avantage d'un ouvrage composé d'une qualité d'acier unique, est qu'il est à l'abri d'un phénomène délétère particulier, à savoir la corrosion électrochimique. A l'époque de la Révolution française, le naturaliste italien Luigi Galvani a découvert que deux métaux différents, en présence d'humidité, développent un courant électrique – c'est la base du concept de la batterie. Ce courant fait que l'un des métaux se dissout et corrode plus vite que l'autre. En d'autres termes, là où deux métaux dissemblables sont en contact direct, il se forme toujours une corrosion particulière, de type électrochimique, qui s'ajoute aux autres effets de la rouille.

A la différence de la tour Eiffel, les hauts fourneaux sont constitués d'une multitude de métaux : différentes qualités d'acier et plusieurs types de fonte, auxquelles s'ajoutent des parties zinguées, et des pièces en cuivre ou en inox. De ce fait, les hauts fourneaux se conservent plus difficilement que la tour.

Une autre différence réside dans les peintures de protection :

La tour Eiffel a été peinte d'origine suivant les indications de son inventeur, qui s'est d'ailleurs occupé par la suite de plusieurs campagnes de repainting quand il était devenu clair que sa tour resterait sur le Champ de Mars à demeure. La tour n'a jamais été décapée, c'est-à-dire remise par sablage dans son état métallique originel, car cette opération exige de fermer, du moins partiellement, la tour aux visites pour des temps prolongés, et la compagnie de la tour Eiffel n'entend pas renoncer si facilement aux recettes de 7 millions d'entrées annuelles. De plus en plus souvent, des couches de peinture superposées en mille-feuille se détachent, et les responsables sont conscients qu'avec la prochaine couche, la 19^e, ils arriveront à la fin de cette méthode de surajouter, et qu'il faudra d'ici peu se résoudre à décapier quand même. La couche de peinture la plus récente, celle de 2009, est à base d'eau, ce qui rend l'opération plus écologique qu'avec les solvants organiques utilisés jusque-là.

D'autres différences entre hauts fourneaux et tour Eiffel méritent d'être mentionnées, notamment le poids et la surface à peindre. Même si cette dernière est presque quatre fois plus haute que les hauts fourneaux, (306 mètres contre 90 pour le B), sa surface à peindre n'est que deux fois plus grande, 250 000 m² contre 100 000 m². La tour est essentiellement creuse, et c'est cela qui explique les différences de ratios.

Pour la technique d'application des peintures sur de tels ouvrages, on a en principe le choix entre l'application au pistolet, et celle à la brosse ronde. Le pistolet est plus rapide, mais les pertes de peinture sont plus élevées. Sur la tour Eiffel, du fait de l'inévitable présence de visiteurs, on ne saurait songer au pistolet. Aussi les structures filigranes ne s'y prêtent guère. Pour les hauts fourneaux, la situation est l'inverse: comme il fallait de toute façon bâcher les travaux de sablage, c'est-à-dire isoler le chantier par une bâche étanche qui confine le sable et les gouttelettes ou aérosols de peinture, le travail au pistolet a constitué la solution la plus économique.

17 L'épisode des faucons pèlerins

Au cours des années 1960-80, le faucon pèlerin était menacé d'extinction, comme suite à l'épandage excessif du DDT dans les champs, et cela au Luxembourg comme dans la plupart des pays voisins.

Depuis que ce produit toxique est interdit, la population des faucons s'est remise progressivement. Au Grand-Duché, les premiers couples ont été observés dans les années 1990, nichant pour l'essentiel dans les rochers du Müllerthal. On sait que ces rapaces affectionnent les points élevés, les contreforts montagneux, les falaises naturelles, mais également les bâtiments et édifices élevés, tels les hauts fourneaux. C'est ainsi qu'au cours des années ou ceux-ci étaient en friche, des couples de faucons s'y sont installés. Ils ont affectionné un endroit particulier, à 46 mètres de hauteur, un genre de plateforme avec des tôles en surplomb qui protégeaient les





couvées contre les intempéries. Pour ces rudes oiseaux de proie qui ne construisent pas de nid, cette construction encaissée était idéale, d'autant plus que le sol était couvert de poussières fines et sablonneuses, qui leur convenaient comme fond de nid.

Quand en avril 2011, les ouvriers ont érigé les échafaudages, ils sont tombés sur un couple de faucon en couvain. Les oiseaux ont de suite attaqué ceux qui leur semblaient menacer les petits, au nombre de quatre. Les ornithologues appelés à la rescousse ont essayé de trouver une solution. Les petits, effarouchés, ont cessé de pousser les cris typiques servant à orienter les parents, et les adultes ont commencé à abandonner leur couvée. Heureusement, un remède a été trouvé : on a placé dans le nid un enregistreur MP3 qui imitait le cri de jeunes. Les parents n'ont pas remarqué le subterfuge, et ont de ce fait recommencé l'approvisionnement de la nourriture. Trois des quatre ont survécu, furent bagués, et adolescents, « comme un vol de gerfauts hors du charnier natal », ont quitté un jour leur nid d'acier.

Quand les travaux de restauration ont atteint le niveau des 46 mètres, un volume de tôles avec un fond de sable y a été aménagé dans l'espoir qu'un jour les faucons reviennent.

On peut mentionner qu'à côté des faucons, d'autres représentants de la gente ailée peuplent les étages des hauts fourneaux, comme les choucas ou encore les rougequeue noirs.

18 Les acteurs du chantier

Le chantier de la restauration a été le théâtre d'opérations de plusieurs corps de métier. Les constructeurs métalliques - la firme luxembourgeoise Arendt-, les échafaudagistes, - la firme luxembourgeoise Echolocation liée à la firme allemande BSD, les peintres, - la firme belge Iris, et les Voltigeurs, et enfin, l'ancien constructeur des hauts fourneaux et spécialiste des questions de construction: la société Paul Wurth.

A l'exception de Paul Wurth, aucune firme n'avait jamais eu affaire à des hauts fourneaux, et le premier jour, tout le monde a été ébahi devant les monceaux d'acier et de fonte. La double tour avec ses multiples annexes semblait, pour les uns « in-échafaudable », pour les autres « in-revêtable », pour d'autres encore « in-escaladable ». Et pourtant ils s'y sont mis, avec inventivité et imagination, leurs compétences aidant. Les différents corps, qui initialement œuvraient dans une indifférence réciproque, ont très vite commencé à se respecter et à respecter le travail des autres. Un tel se retenait de tronçonner une poutrelle pour éviter de lancer une gerbe d'étincelles sur la peinture fraîche d'un peintre, tel autre préférait prendre une autre position, quitte à être plus inconfortable, pour ne pas abîmer l'effort d'un collègue. L'œuvre commune induisait la solidarité. Les entrevues et conférences de chantier, régulières et rythmées avec discipline, y étaient pour beaucoup.

A ces différents métiers présents en permanence se sont ajoutées des sociétés auxiliaires, telle Luxcontrol.

Ce livre a décrit ce long cheminement de la façon la plus fidèle possible. L'auteur a eu la possibilité de participer à toutes les phases, « an embedded reporter », comme disent les médias américains, et cela depuis les premières réflexions sur la méthodologie, jusqu'aux derniers ajustements, en passant par les essais et mise au point des peintures. Il tient à remercier les personnes suivantes, qui ont apporté leur témoignage :

Par ordre alphabétique des firmes

M. Keiffer, société Arendt,
M. Schroeder, consortium A.M Echolocation - BSB,
MM. Janssen, Douny et Zemljak, société Iris,
M. Luxen, société Paul Wurth,
les deux responsables du Fonds Belval,
MM. Stéphane Frieres et Carlo Mathias.

19 Epilogue

Les travaux de restauration se sont achevés en 2014. Le chantier a duré exactement 1000 jours, au bout desquels les hauts fourneaux étaient mués en « monuments dans la cité ». Les essais pour la recherche de la meilleure des peintures possibles ont nécessité une durée similaire, ce qui a fait en tout un effort de 2000 jours. La restauration a été unique en son genre, car la démarche n'a pu s'appuyer en rien sur des précédents.

Contrairement aux hauts fourneaux historiques de nos pays voisins, ceux de Belval sont à tel point intégrés dans le paysage urbain, que le visiteur ou le citoyen se sent plutôt dans les hauts fourneaux qu'en dehors; en d'autres termes, il les appréhende de l'intérieur, quasiment comme habitant, et non pas de l'extérieur, comme il voit, en touriste, ceux des autres parcs industriels. C'est cette convivialité urbanistique qui est l'atout majeur du site.

A la fin du chantier, les acteurs des mille jours ont ressenti, romantiques malgré eux, un point de nostalgie, comme toujours au moment où une grande affaire s'achève. Par une belle matinée de l'été 2013, deux contre-maîtres, sur le point de quitter le chantier, se sont retrouvés une dernière fois sur une plateforme élevée du Haut Fourneau A et ont contemplé le nouveau site, qu'ils voyaient comme leur œuvre, au moment où le soleil matinal faisait resplendir les structures industrielles. L'un d'eux, se tournant vers son collègue, dit, non sans émotion :

« C'est là quand même le plus beau chantier de ma vie ».

Il y a un siècle, les premiers Hauts Fourneaux de Belval ont posé des jalons importants de l'économie du Luxembourg. Leurs successeurs, les « monuments dans la cité » symbolisent cette évolution. Mais le regard sur le passé doit toujours s'accompagner de celui sur l'avenir. Gageons qu'à l'ombre des hauts fourneaux en beauté, se développera la nouvelle Cité des Sciences, clef du développement des années à venir.

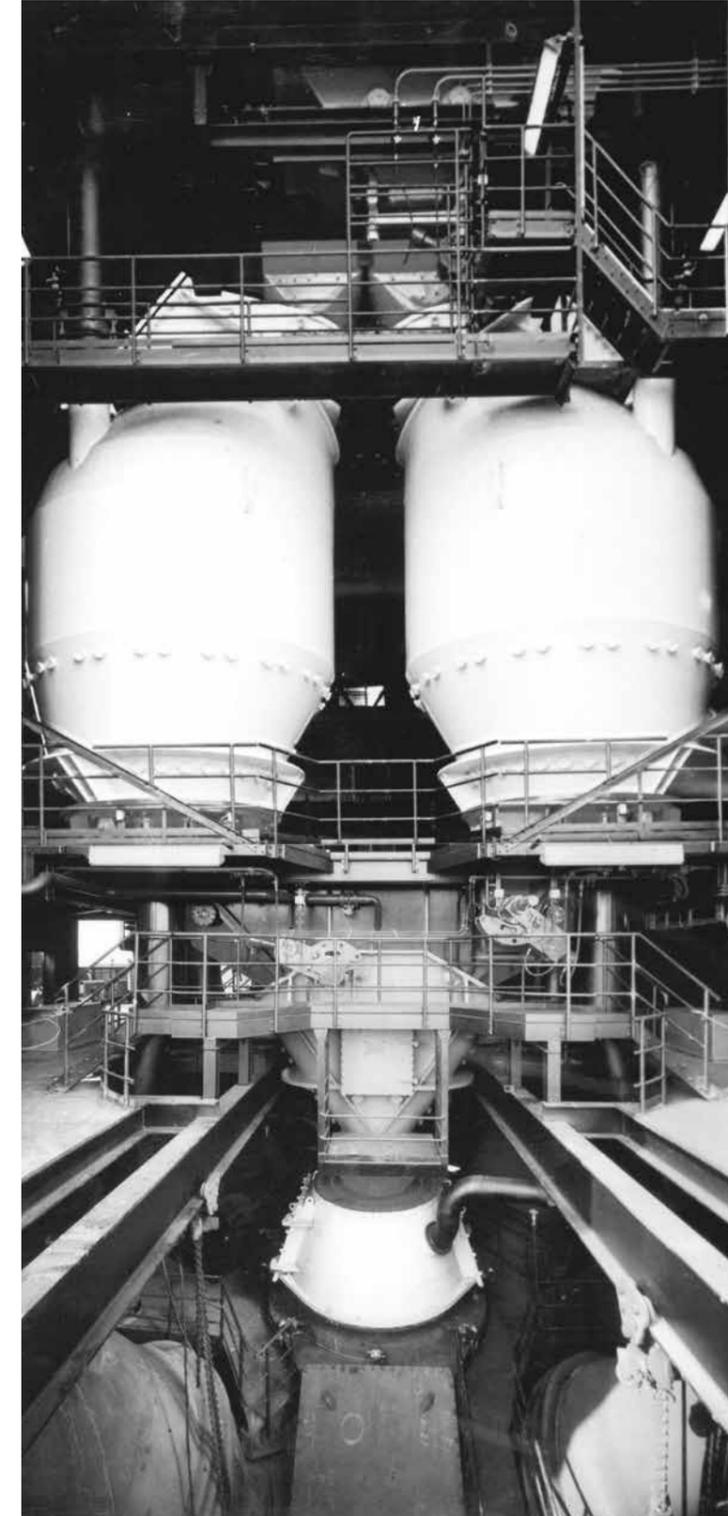


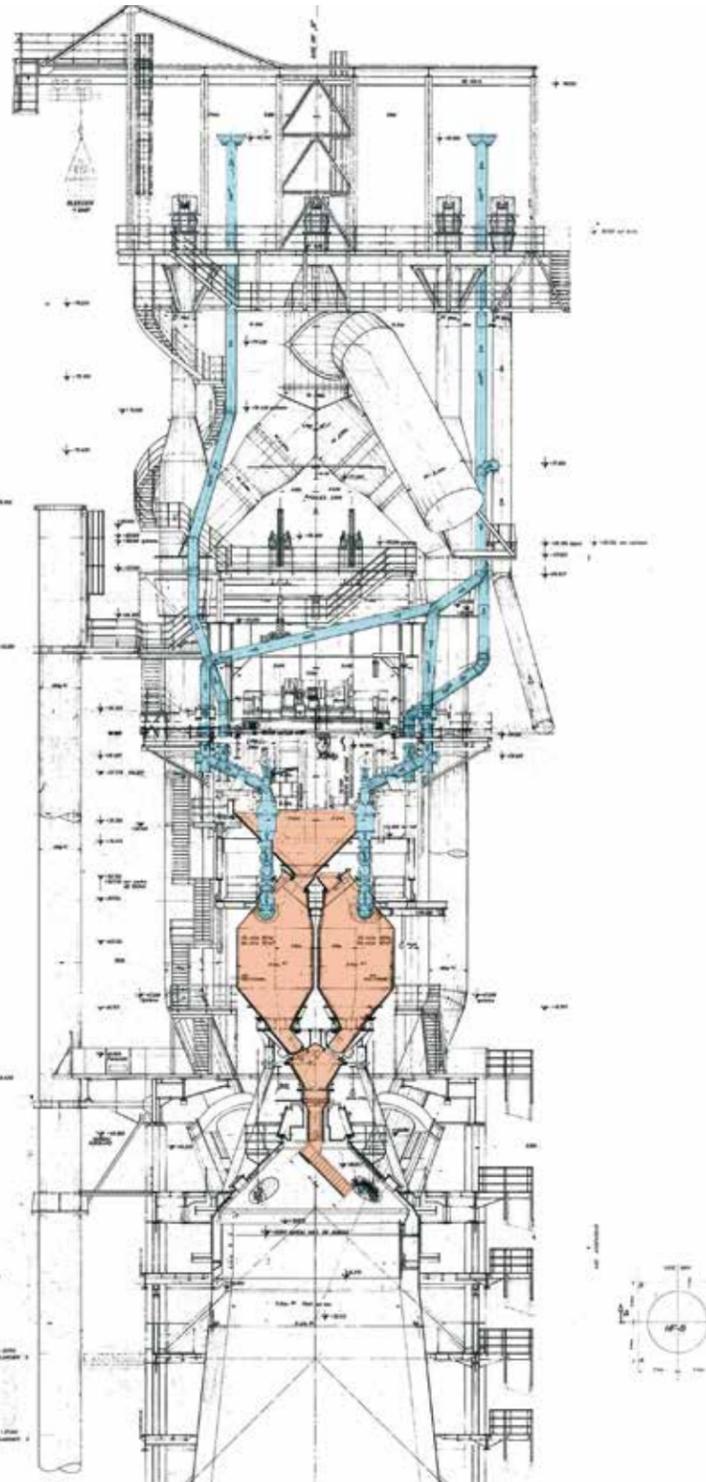
Annexes

Annexe 1

Les gueulards sans cloche (de Paul Wurth S.A.)

Depuis sa genèse au 17^e siècle, et pendant la majeure partie des trois siècles suivants, le haut fourneau avait gardé un point faible, à savoir son ouverture supérieure, appelée gueulard. C'était le point d'entrée de la charge, donc du charbon de bois, (et plus tard du coke), des minerais (et plus tard des agglomérés) et de diverses additions destinées à optimiser le lit de fusion. C'était également par cette ouverture que s'échappaient, en sens inverse, les fumées et les gaz, et que se perdait la chaleur. Les flammes de gaz brûlant qui en sortaient faisaient reconnaître les hauts fourneaux de loin, et cela jusqu'au milieu du 19^e siècle. Les choses ont changé à partir de 1857, quand l'ingénieur anglais Edward Cowper breveta une invention qui depuis porte son nom, à savoir un récupérateur de chaleur. Cette invention du cowper, qui permettait de réduire la consommation de coke d'un tiers (et donc aussi des émissions de CO²), suivit de deux ans celle de la cornue d'affinage par Henri Bessemer. L'engin de Cowper présumait la mise en place, au sommet du haut fourneau, d'une fermeture capable de capter les fumées et leur chaleur. Avec les inventions de Cowper et de Bessemer, ce n'étaient plus les hauts fourneaux, mais les cornues des aciéries qui illuminaient désormais les cieux nocturnes des bassins sidérurgiques.





Plan du gueulard sans cloche du Haut Fourneau B

Plusieurs systèmes de fermeture de gueulard furent développés, qui ont connu des fortunes diverses. Au milieu du 20^e siècle, la technique universellement adoptée était le gueulard avec un sas comportant une double cloche, illustré par le schéma suivant :

Le diagramme montre que ce système, qui comporte deux cloches, sous forme de deux cônes d'acier montés sur des axes concentriques verticaux, fonctionne à la manière d'une écluse. Les cloches permettaient d'éviter le contact direct entre atmosphère interne et externe. S'il avait le mérite de mieux fonctionner que ses prédécesseurs, ce système comportait cependant des désavantages patents : le premier concernait la façon dont la charge tombait dans la cuve du réacteur. Telle une avalanche de matières pondéreuses, des dizaines de tonnes dégringolaient et glissaient d'un coup et se déposaient suivant un entassement concentrique, à l'image de l'ouverture annulaire entre cloche et parois de la cuve. Ce profil de chargement était loin d'être optimal, car il induisait une descente de charge asymétrique.

Le second désavantage résidait dans l'usure des cloches. Leurs bords inférieurs devaient respecter une précision géométriquement rigoureuse pour assurer une étanchéité élevée contre une pression interne de 2 à 3 bars. En d'autres termes, une cloche en acier coulé, de plusieurs mètres de diamètre, avec une paroi épaisse de 10 centimètres, épaisse donc comme une plaque de blindage d'un cuirassé,

devait garder une tolérance de l'ordre de la fraction du millimètre. Or l'abrasion des milliers de tonnes de matières dures avait rapidement raison de cette précision géométrique, et tous les deux ans environ, il fallait programmer un arrêt du haut fourneau pour ré-usiner les bords.

Par ailleurs, la course au gigantisme des hauts fourneaux n'améliorait pas la situation et à la fin des années 1960, les haut fournistes étaient conscients d'avoir atteint la limite du développement des cloches. En 1969, les choses ont fondamentalement changé, avec une invention de la société Paul Wurth S.A. Rappelons brièvement son histoire. Au tournant des 19^e et 20^e siècles, un industriel luxembourgeois, Paul Wurth, avait repris une petite entreprise située à Hollerich, et l'avait orientée vers la construction métallique et les services sidérurgiques. Entrepreneur visionnaire, Paul Wurth était également impliqué dans l'acquisition du brevet de laminage pour les poutrelles Grey de Differdange. A titre anecdotique, il avait été le premier Luxembourgeois à acquérir une voiture à essence. Vers la fin des années 1960, la société Paul Wurth, comme maint autre équipementier sidérurgique, était à la recherche d'une solution au lancinant problème du gueulard, dans le contexte d'une course mondiale aux hauts fourneaux de plus en plus grands.

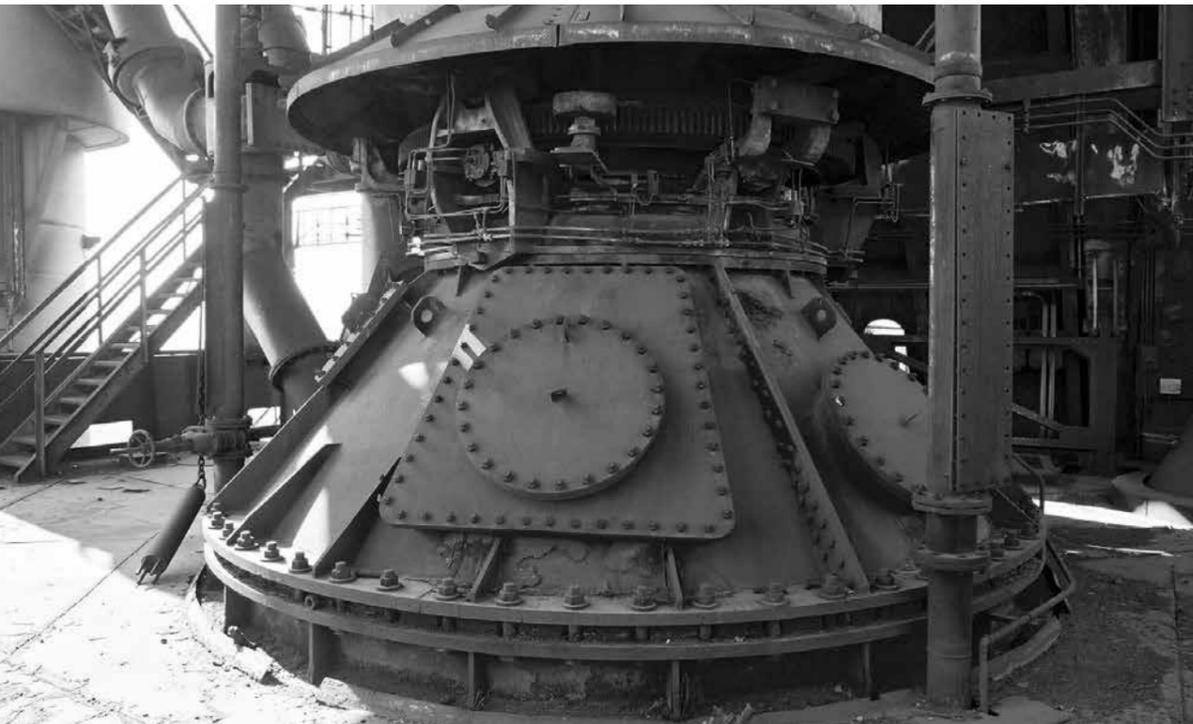
Deux ingénieurs de cette société, Edouard Legille et René Mahr, ont alors opéré la percée technologique qui allait propulser Paul Wurth sur une orbite internationale. Ils ont signé conjointement, le 31 juillet 1969, le brevet d'invention de ce qui allait dorénavant s'appeler « gueulard sans cloche », en anglais « Bell-Less Top ». L'idée centrale consistait à remplacer la double cloche par une goulotte tournante, capable de changer son angle d'inclinaison, ceci de façon à permettre à l'opérateur de diriger avec une grande précision la distribution des matières. Cette façon de faire substituait au chargement discontinu par les cloches un chargement quasi continu, plus en phase avec la marche générale du four. L'invention de Paul Wurth était à ce moment l'étape la plus récente de la tendance générale du discontinu vers le continu qui a marqué la sidérurgie du 20^e siècle, comme l'invention du laminage à chaud, avec le premier train continu développé en 1925 (alors que jusque-là on laminait tôle par tôle), le laminage à froid en continu dès 1929, le recuit en continu et la galvanisation en continu dans les années 1930, le prélaquage en continu dans l'immédiat après guerre, et finalement, dans les aciéries, la coulée continue à partir des années 1960. Le seul procédé sidérurgique continu qui reste encore à inventer est l'affinage continu dans les aciéries.

Pour revenir à Paul Wurth, le caractère innovant de l'invention a rendu nécessaire la construction préalable d'un modèle de gueulard sans cloche à échelle réduite. De tels modèles furent construits dans les ateliers de Hollerich. Dans le courant de 1971, vérifications et préparatifs terminés, l'aventure industrielle pouvait commencer.

Mais comme tel est souvent le cas, nul n'est prophète dans son propre pays: ce n'est pas l'Arbed qui a commandé le premier gueulard sans cloche, - c'est la August Thyssen Hütte. A ce moment, l'Arbed avait plusieurs hauts fourneaux en activité, dont notamment les deux gros engins de Belval, construits en 1965 et 1969, qui se seraient bien prêtés à la nouvelle invention. Ces réticences-maison ont fait que le premier gueulard sans cloche fut monté en Allemagne, sur le haut fourneau n° 4 de Hamborn, qui était alors en fin de campagne. Le 9 janvier 1972, la goulotte se mit en mouvement pour la première fois - et ce fut le début d'une longue success story.

Au vu des excellents résultats de son concurrent Thyssen, l'Arbed devait réagir, et c'est en 1975 qu'un gueulard sans cloche fut installé sur le Haut Fourneau B, à l'occasion d'une réfection générale. C'est ce gueulard, témoin de l'ingénierie luxembourgeoise, qui a préservé le Haut Fourneau B d'un démontage partiel lors des travaux de restauration qui l'aurait laissé subsister seulement à l'état de silhouette.

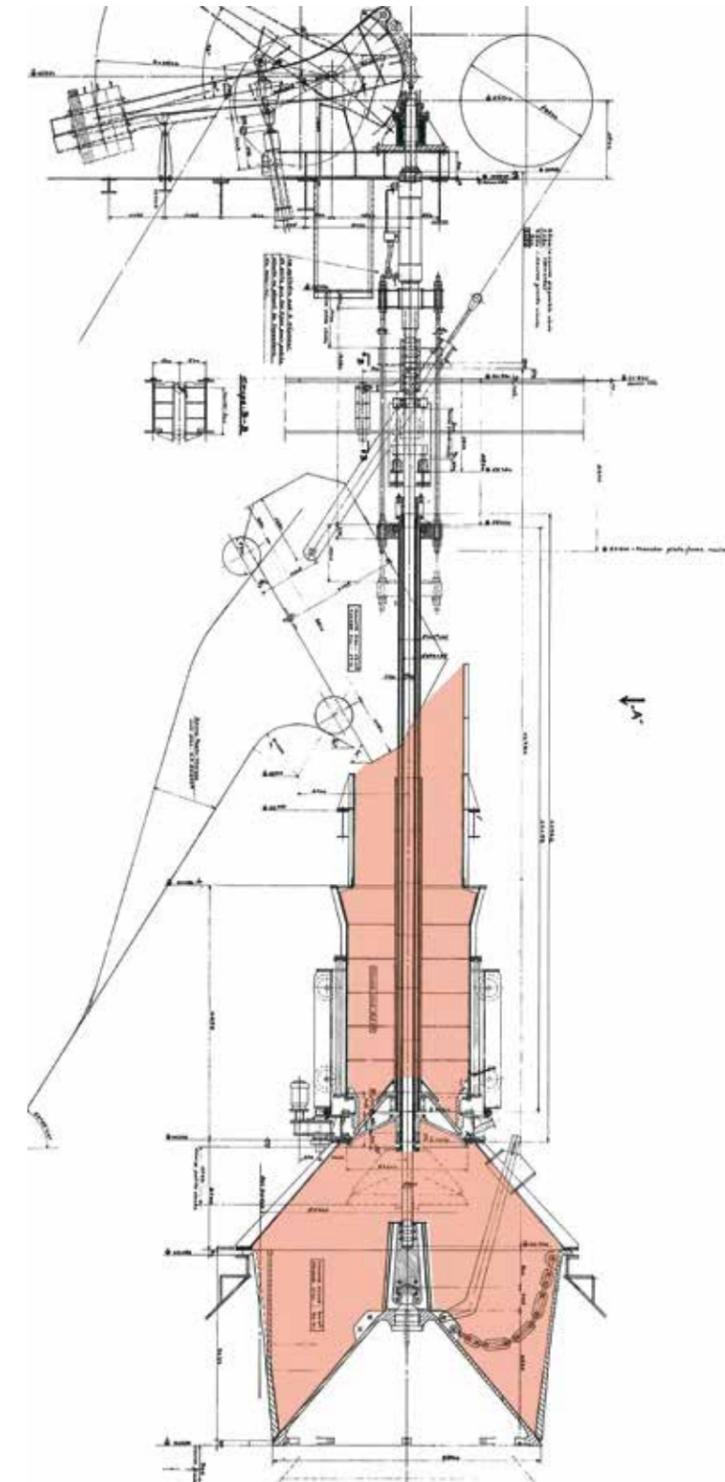
Par ce nouveau gueulard, Paul Wurth S.A. a profondément modifié le haut fourneau et l'a converti en un engin sous pression, à haut rende-



Couvercle conique du gueulard à cloches du Haut Fourneau B

ment, plus économe en énergie. Sur environ un millier de hauts fourneaux qui existent dans le monde, environ 600 dépassent une production de 1 million de tonnes de fonte par an et sont donc susceptibles d'un équipement en gueulard sans cloche. Au début du 21^e siècle, Paul Wurth en a fourni au-delà de 200, contrefaçons non comprises. Son gueulard est maintenant reconnu comme standard international pour le chargement des hauts fourneaux et la société s'est imposée comme leader mondial des solutions d'ingénierie pour la production de fonte.

La solution développée par Paul Wurth comprend un mécanisme d'éclusage basé sur un système de trémies, qui bouche le haut fourneau au gueulard de façon étanche et sûre. L'élément clé est la goulotte de distribution, un chenal mi-ouvert, par laquelle les matériaux sont distribués dans le haut fourneau, suivant les indications de l'opérateur. Cette goulotte décrit un mouvement de rotation continu et son angle d'inclinaison peut se modifier. Ceci permet de déposer les matières à l'endroit précis voulu, ce qu'aucun autre système n'avait su réaliser auparavant. Les mouvements de rotation et de translation de la goulotte partent d'un réducteur central, une pièce importante qui peut peser jusqu'à 35 tonnes. La transmission simultanée des deux mouvements se fait par un réducteur planétaire, qui constitue la pièce-maîtresse du système de chargement. Les matériaux employés font que la durée de vie de tels équipements est de 20 ans, ce qui est considérable si on se rappelle qu'ils exécutent chaque jour



Coupe du gueulard à cloches du Haut Fourneau A

des fonctions de grande précision dans une atmosphère de quelque 100° C, abrasive et corrosive, car chargée en poussières et en alcalins.

Paul Wurth S.A. a travaillé en étroite association avec l'Arbed pendant plus d'un siècle, et cela jusqu'en 2012, moment où la maison mère Arcelor Mittal a vendu 48% des parts au groupe allemand SMS de Düsseldorf. 11% des parts de Luxempart ont également été cédés pour 60 millions €, de sorte que le Groupe SMS est désormais propriétaire à hauteur de 59,1%.

Le Haut Fourneau A et son gueulard AVEC cloches

Sur le Haut Fourneau A, les cloches originales du gueulard de 1965 subsistent. Au moment de la décision de l'Arbed d'acquérir un gueulard de type Paul Wurth, le B était le plus avancé des deux et le choix pour la modernisation tomba tout naturellement sur lui. Une occasion de refaire le A également ne s'est plus présentée, du fait des crises et des incertitudes des années subséquentes. A l'heure actuelle, le A détient toujours ses cloches d'il y a plus d'un demi-siècle, cloches qui font désormais partie du « monument dans la cité ». Elles ne seront pas directement accessibles au public, - certainement pas dans un avenir proche. Il est en principe possible d'aménager des lucarnes à cet effet, mais l'avenir dira si cette modification sera faite. Etant à l'abri des intempéries, en acier moulé de forte épaisseur, un traitement anti corrosion s'est avéré superflu, ce qui va également dans le sens de son caractère historique.

Ajoutons encore que le Haut Fourneau B, dédié à l'esprit inventif des ingénieurs luxembourgeois, a failli connaître un sort moins glorieux que celui de monument national. En effet, quelque temps avant l'arrêt définitif de la filière fonte en 1997, la direction de l'Arbed a tenté de le vendre, à l'image du C, non pas en Chine comme ce dernier, mais en Egypte. Une société sidérurgique égyptienne était intéressée, et les propositions de prix de vente pour ce haut fourneau d'occasion ont tourné autour de 300 millions de francs luxembourgeois (c'est à dire 7.5 millions d'euros 1997, sans calcul d'inflation). Toutefois, l'affaire n'a pas eu de suites.

Annexe 2

Journal des essais

Voici, à titre documentaire, quelques pages extraites du Journal 2006-2008 des Essais de Peinture de l'auteur du livre. La typographie reflète le fait que le Journal est manuscrit, c'est-à-dire des notes prises sur le vif sur le chantier. Ces essais avaient pour but d'examiner tous les aspects des propriétés et de la mise en œuvre des différents systèmes de peinture qu'ont proposé les producteurs PPG, Sigma, International Paint, BAST/Relius et Dupont.

7 juillet 2008, Une nouvelle étape pour la conservation des hauts fourneaux vient d'être entamée. Il ne s'agit pas encore des travaux définitifs, mais d'une série d'essais grandeur nature que le Fonds Belval juge indispensable avant de se lancer dans l'irréversible. Ces essais doivent répondre à une série de questions, que l'on va évoquer tout au long de ce journal.

Le 7 juillet, supposé une belle journée d'été, propice à la mise en peinture, a été en fait une journée infecte. Des bourrasques ont chassé des nuages bas sur un ciel d'anticyclone, faisant alterner de brèves périodes ensoleillées avec des précipitations, courtes, il est vrai, mais qui ont empêché les travaux de se dérouler de façon continue.

La première étape consiste à voir comment va se dérouler le sablage. Le programme d'essai a prévu le nettoyage de quelques mètres carré sur la partie coudée de la conduite du gascleaner appartenant au Haut Fourneau A. Les travaux ont débuté vers 10 h du matin.

La firme Stasiak, chargée du projet, a installé une nacelle hydraulique et l'opérateur, en casque, masque et uniforme s'y affaire. Cependant, au bout d'un quart d'heure, les rafales de vent font tellement gigoter la nacelle que le chef de Stasiak, Norman May, interrompt les travaux pour des raisons de sécurité. Pour les quelques mètres carrés de la surface des essais, il n'a pas été jugé utile de mettre en place des bâches. Cela n'est pas resté sans conséquences. Alors qu'on était encore à plus de cent mètres du haut fourneau, on sentait fortement le picotement des grains de sable sur le visage. Il y en avait d'ailleurs partout. On se serait cru au Sahara dans une tempête de sable. Heureusement que le site n'est pas encore vraiment habité.

Le responsable de la société fait descendre la nacelle à une

hauteur moins exposée aux bourrasques. On est toujours surpris de constater à quel degré la force du vent varie avec la hauteur. L'opérateur commence alors à traiter la panse de l'épurateur, et le travail va bon train.

L'après-midi, je me positionne dans l'avenue des Hauts Fourneaux, pour prendre les premières photos de la scène, car de tels images se prêtent bien pour illustrer les premières pages du futur livre. Au bout de quelques minutes, l'opérateur doit à nouveau arrêter son travail à cause du vent, et cette fois, il abandonne et fait descendre la nacelle jusqu'au sol. Autant faire une pause. Je l'interpelle et il vient auprès de la clôture et je lui pose quelques questions sur le travail. Il me dit que le sablage lui semble normal pour une peinture aussi vieille. Le sable de quartz qu'il a utilisé est de calibre 10. Par ailleurs, il a observé qu'au niveau des soudures la peinture est mal adhérente et se détache très vite, et qu'en pleine surface, elle adhère encore assez. Bien qu'il voit mal les couleurs à travers son masque, il a constaté que la peinture était en triple épaisseur, une couche de minium de fond, une couche gris jaune intermédiaire et une couche de finition.

Avec le temps qui continue à se dégrader et le vent qui souffle de plus en plus fort, il est impossible de faire des essais de pistelage airless à une telle hauteur. On risquerait de saupoudrer toutes les voitures, dans 1 km à la ronde, d'une myriade de points de peinture. C'est là la conséquence d'avoir omis de mettre des bâches pour les essais, bien que cette mesure soit prévue pour la mise en peinture définitive.

.....

8 juillet 2008, on a remarqué un double problème de sablage. D'abord le fait que le laveur porte trois couches de vieille peinture rend les opérations de nettoyage nettement plus longues que prévu. C'est surtout le minium qui est difficile à déloger.

Le second problème est que le travail de sablage d'hier a été en partie anéanti par les pluies abondantes qui ont déclenché une rouille superficielle et très rapide sur les surfaces avivées par le sablage et donc très réactives. Toutes ces surfaces nécessitent un re-sablage léger. Ceci est notamment important dans le cas des primaires riches en zinc. Une couche de rouille même très fine interrompt le circuit électrique susceptible de jouer dans le cas de la protection cathodique offerte par ces primaires.

Or c'est justement ceux-ci que l'on veut tester aujourd'hui. A noter qu'il existe des peintures qui peuvent très bien adhérer sur une telle rouille légère, mais ces peintures agissent autrement que par protection cathodique. Celle-ci assure quand même la meilleure protection sur le long terme. Vers 10h, deux techniciens de PPG, dont Monsieur Gert Brouns, sont venus avec leur équipement et les bidons bleu blancs, visibles de loin. Ils ont amené deux systèmes, le Clearcoat, un vernis transparent deux composants, et le système Amercoat 68 + le PSX 700, de ton gris Ral 7039.

Le Clearcoat a été appliqué sur 3-4 m² au niveau sol des cowpers du Haut Fourneau A, en deux endroits voisins, directement sur la surface non nettoyée, soit rouillée, soit couverte de peinture ancienne. Le Clearcoat a très esthétiquement ravivé les couleurs, en les intensifiant, du moins



Nettoyage à haute pression

tant qu'il était encore semi liquide. On verra le résultat, quand la polymérisation sera achevée.

Il était prévu d'appliquer le système des polysiloxanes sur le coude supérieur du laveur du A, à quelque 30 mètres d'élévation, sur l'endroit fraîchement sablé. Le primaire, également à deux composants, a été préparé au niveau du sol. J'étais très surpris du poids d'un tel primaire. La charge en

zinc métallique est si élevée que le bidon donne l'impression d'être constitué de métal massif.

Il fallait d'abord remuer cette masse très lourde, pour remettre toutes les particules de zinc en suspension. Cela m'est apparu comme une opération sur laquelle on peut tricher facilement dans la suite quand le chantier sera en pleine activité et que tout ne pourra pas être contrôlé de façon si détaillée. Et le résultat, en cas de tricherie, sera doublement mauvais, car en laissant des amas de zinc dans le fond du bidon, on risque d'avoir une première partie de peinture déficiente en zinc, et une seconde qui en sera surchargée. Or les particules de zinc doivent être présentes dans une quantité bien déterminée par le producteur.



Endroit du clearcoat PPG

L'opérateur avec qui j'avais hier un bout de conversation était très intéressé, et mettait bien la main à la tâche. Il se tenait dans sa nacelle, qui bougeait, en dépit du fait que le vent était beaucoup plus faible que hier. Ceci dit, le temps était idéal, une brise légère et quasi pas de soleil, idéal

pour la polymérisation des peintures.

Domage que par suite des horaires des opérateurs, on n'avait plus le temps d'appliquer le PSX comme couche de finition sur le primaire, mais ce dernier supporte bien d'être exposé quelques jours à l'atmosphère.

.....

9 juillet 2008. Dupont de Nemours vient inspecter les lieux, ensemble avec Monsieur May de la firme Stasiak, pour organiser ses essais. Ils seront doubles. D'un côté, pour la conservation historique des endroits où on préfère garder la patine, tel par exemple sur le blindage des hauts fourneaux, qui n'a jamais été peint, pour de bonnes raisons, et de l'autre pour préserver le cas échéant les peintures anciennes, là où cela vaut encore la peine.

La rouille, suivant Dupont, peut être conservée, si on enlève d'abord les parties mal adhérentes et qu'on stabilise chimiquement le reste de la rouille, par leur Gardobond, et qu'on la recouvre par après d'un vernis transparent polyuréthane acrylique.

Quant à la peinture ancienne à conserver, elle concerne essentiellement les cowpers et les épurateurs de vent du A, qui sont tous revêtus avec des couches argentées, devenues très mates avec le temps, mais qui de loin, apparaissent comme très satisfaisantes. Pour les conserver, Stasiak préconise une couche de finition 9022 nacré au lieu du 9006, bien que cette dernière soit également acceptable, mais montre plus clairement les retouches de loin. Il existe également un pseudo 9006 à plus faible teneur en métal, et peut être plus apte pour les hauts fourneaux.

Vues de près, les peintures anciennes des cowpers montrent cependant des défauts assez nombreux, d'abord les endroits où la peinture est écaillée, assez rares, il est vrai, ensuite, les endroits, beaucoup plus nombreux, où elle a été abîmée, le plus souvent par des travaux de soudage, anciens ou récents, et finalement, beaucoup d'endroits sont salis, peut être irrémédiablement par des coulures de rouille en provenance de structures annexes aux cowpers, des passages, des escaliers, etc, souvent en épaisseurs minces, qui n'ont pas tenu le coup et qui se sont détériorés en lâchant dans la nature de grandes quantités de rouille que l'eau de pluie a réparti en grosses traînées sur la hauteur des cowpers.

C'est cet ensemble de dégâts que Dupont se propose de réparer.

15 juillet Double essai au niveau des cowpers du Haut Fourneau A. D'un côté, il s'agit de savoir comment préparer au Kaercher la surface des grosses vanes en fonte, produite par l'usine de Wecker, et de l'autre de voir si le Kaercher arrive à nettoyer la vieille peinture gris métallique du corps des cowpers.

Une remarque préliminaire s'impose de suite : quand on observe les quantités d'eau nécessaires au nettoyage par le Kaercher, on se demande ce qui se passe avec ces eaux, si elles sont chargées de métaux lourds, et passent intégralement dans le sous-sol. Pour le moment, avec les pressions de 200 atm qu'on utilise, les peintures, et surtout les sous couches de minium ne sont pas enlevées. Tel serait cependant le cas, si on passait à du sablage humide, comme le préconise Relius.

Le Kaercher nettoie bien les surfaces de fonte et d'acier, et laisse en place, comme il fallait s'y attendre, la rouille adhérente. Cette surface sera ainsi propre pour recevoir une couche de vernis transparent Amercoat à côté des surfaces Amercoat Clearcoat non nettoyées au préalable, enduite il y a une semaine par Brouns.

ANNEXE 3

Un regard sur la corrosion de l'acier.

Les métaux industriels, sans exception, se dégradent avec le temps, irréremédiablement et irréversiblement : le cuivre se couvre de vert-de-gris, l'étain est ruiné par une véritable 'peste', le zinc est rongé par une épidermure grisâtre et le fer et l'acier rouillent, de même que la fonte, même si elle rouille beaucoup plus lentement. Comment s'expliquent ces phénomènes ? La cause profonde de la dégradation réside dans le fait que ces éléments sont instables dans leur état métallique, et qu'ils ont une tendance innée à retourner à un état naturel, état qu'ils retrouvent dans leur combinaison avec l'oxygène. Ce sont là les lois de la thermodynamique. Les phénomènes de corrosion du fer se comprennent à l'aide du schéma suivant :

(1) MINERAI → METAL + OXYGENE
 (2) METAL + OXYGENE → MINE-RAI / ROUILLE

Alors que la ligne (1) représente le travail du métallurgiste, qui fait passer le minerai à l'état de fer métallique, la ligne (2) décrit le travail inverse de la nature, qui ramène le métal à son état initial. La première ligne décrit un processus qui nécessite beaucoup d'énergie, alors que la seconde montre un processus qui se déroule spontanément, sans apport d'énergie. Dans le cas du fer, la rouille est une forme particulière de minerai. Ainsi ce métal, que l'on a extrait à grand renfort d'énergie de son minerai, c'est-à-dire de sa combinaison avec l'oxygène, a une très forte tendance à y retourner. En d'autres termes, le phénomène de rouille (naturel) renverse le processus (artificiel) du haut fourneau. La tendance à retourner à l'état de minerai varie d'un métal à l'autre. Il y en a qui n'y

retournent que très lentement ; ce sont les métaux 'nobles' : or, argent, cuivre, étain etc. Ce sont là également les seuls métaux que l'on peut trouver dans la nature à l'état métallique ; on parle alors de cuivre natif ou d'étain natif. Les métaux moins nobles, parmi lesquels on compte la plupart des métaux industriels, sont toujours trouvés dans leur gisement naturel liés à l'oxygène (ou au soufre comme c'est le cas du cuivre). Plus un métal est fortement lié à l'oxygène, plus il est difficile de l'en séparer. Si on regarde l'évolution des techniques sur les millénaires passés, on s'aperçoit que les métaux ont été découverts à peu près dans l'ordre de la ténacité de leur lien à l'oxygène. Ainsi, ce n'est pas par hasard que l'âge du bronze a précédé l'âge du fer : le cuivre et l'étain sont beaucoup plus faciles à délivrer de leur minerai que le fer, et donc, par voie de conséquence, ils ont moins tendance à y retourner : ils rouillent moins vite. Autre exemple : l'étain et le zinc, que l'on utilise tous les deux pour protéger le fer, soit sous forme de fer-blanc (couche d'étain) ou de galvanisé (couche de zinc). L'étain, un métal assez noble, est connu depuis la haute antiquité ; le zinc, par contre, beaucoup plus lié à l'oxygène, n'a pu être produit à l'état métallique qu'au 16^e siècle. Et il a fallu attendre la fin du 18^e siècle pour obtenir du cobalt et du chrome, et le 19^e siècle pour l'aluminium, le plus fermement lié à l'oxygène.

Il faut savoir que les conditions extérieures qui entourent le phénomène de corrosion jouent un rôle tout à fait crucial. Sinon on ne pourrait comprendre que des objets en fer romains aient pu subsister pendant 2 millénaires, ou que l'épave du Titanic existe encore, un siècle après le naufrage, alors que les pieux d'une clôture rouillent misérablement au bout de 10 ans.

Quels sont donc les facteurs qui précipitent ou qui ralentissent le processus de

corrosion ? D'abord, il faut de l'humidité, c'est un constat. Mais l'eau ne suffit pas, sinon le Titanic n'existerait plus. Il faut en outre la présence d'oxygène. Sans cet élément, point de corrosion. Les objets romains ont été trouvés dans des sols totalement imperméables à l'air. Et le Titanic se trouve à une profondeur d'eau où la teneur d'oxygène dissous est infime. Donc sans oxygène ni eau, pas de corrosion. Ces deux éléments doivent œuvrer conjointement, du moins aux températures ambiantes. Et ils le feront d'autant plus efficacement, si l'eau renferme un sel qui la rend électriquement conductrice et si l'air renferme des gaz actifs tels le SO^2 . Voilà réunis les coupables. Et voilà également qui explique que les pieux de clôture rouillent si vite, et surtout à l'interface avec le sol. La partie au-dessus du sol sèche rapidement, celle bien enfouie dans le sol y rencontre un manque d'oxygène. Ces endroits restent relativement indemnes alors que le pieu rouille le plus vite à l'endroit où les trois éléments néfastes se trouvent réunis, l'oxygène, l'eau et les sels.

De ce point de vue, un haut fourneau à l'arrêt ne se comporte pas mieux que le pieu de clôture fiché dans le sol. Aussi longtemps qu'il reste en activité, il se protège des atteintes corrosives, puisque sa chaleur chasse le gros de l'humidité. Mais une fois à l'arrêt, les ennuis commencent. On rencontre alors par milliers des endroits où les conditions néfastes sont réunies : les raccords complexes de poutrelles avec des interstices qui attirent l'eau par osmose, les profilés mal orientés qui recueillent la rosée, les planchers en tôles larmées qui retiennent les flaques, les structures tubulaires fonctionnant comme de véritables trappes d'humidité et les innombrables autres corps creux, - tous sont incapables de drainer l'eau de pluie et de condensation et concourent de

ce fait à leur propre ruine. A cela s'ajoute l'agression d'agents nocifs, tel le dioxyde de soufre, toujours présents dans l'air, qui se dissolvent dans cette eau stagnante et la rendent encore plus agressive. Il faut également relever que la rouille appelle la rouille. Une couche de corrosion étant poreuse, elle retient l'eau à des endroits qui auparavant étaient naturellement drainés. Le phénomène s'autoaccélère.

Pour donner une mesure quantitative du délabrement apporté par la corrosion du fer, il faut savoir qu'en 10 ans, et dans des endroits mal ventilés tels ceux décrits plus haut, la corrosion peut facilement enlever plus de 2 mm d'épaisseur d'acier par face. En d'autres termes, après une décennie de telles attaques, des objets d'acier épais de 5 mm, épaisseur pourtant d'apparence solide, peuvent avoir entièrement disparu, convertis en rouille. L'état ultime d'un haut fourneau à l'arrêt, non protégé, est une pathétique pyramide de rouille.

Bien sûr, il existe une pléthore d'armes pour contrer efficacement ces ravages du temps. Le bon sens indique la première démarche, la précaution la plus élémentaire : c'est la mise en œuvre de mesures constructives « anti-rouille », propres à évacuer le plus rapidement et le plus complètement les eaux de pluie et de condensation. Cela revient à créer des ouvertures de drainage, à éliminer les endroits d'accumulation, à installer des descentes de pluie.

Ensuite, pour véritablement préserver l'acier il y a lieu de l'encapsuler complètement et de l'isoler des agressivités de son environnement. On peut y arriver très efficacement en revêtant l'acier entièrement d'un autre métal qui corrode beaucoup plus lentement : c'est la technique éprouvée de la galvanisation. C'est celle qui assure la meilleure pérennité à l'ouvrage. Mais comme le zinc se détériore aux températures élevées, on n'a jamais utilisé

cette technique sur les hauts fourneaux mêmes, sauf quelques fois dans leurs structures auxiliaires. Et pour des raisons de sauvegarde du patrimoine, il n'est pas envisageable d'altérer l'aspect d'un haut fourneau en le galvanisant à postériori. L'autre moyen classique pour la sauvegarde d'un ouvrage est évidemment l'application d'un système de peinture, garant d'une bonne longévité. Ces peintures doivent apporter, outre l'élément visuel dans le sens historique, des fonctions de protection électrochimique et surtout des fonctions d'adhérence. Sans une excellente adhérence au substrat, aucune peinture ne saurait remplir durablement son rôle protecteur ; elle s'écaillerait au bout de quelques saisons. Les meilleures peintures sont celles qui se conçoivent en multicouche, ou chaque couche joue un rôle physico-chimique et décoratif spécifique. Bien sûr, appliquer une peinture en double ou triple couche sur un ouvrage aussi complexe et aussi difficile d'accès qu'un haut fourneau n'est pas une petite affaire. Elle doit se préparer et s'exécuter avec les plus grands soins. Mais appliquée dans les règles de l'art, elle est le garant d'une longévité assurée, comme le montrent des monuments historiques, peints et repeints, telle la tour Eiffel.

Sur les objets métalliques qui ont vieilli, on se méprend souvent sur les couches qui les recouvrent. Elles sont suivant le cas : rouille, calamine et patine.

La rouille

La rouille se développe sur les surfaces d'acier exposées aux intempéries, ou à toute autre conjugaison d'oxygène, d'humidité et d'éléments accélérateurs de corrosion comme le dioxyde de soufre. Sauf rares exceptions, tels les aciers dits patinables, la rouille apparaît sous forme d'excroissances friables et mal

adhérentes, qui en se détachant, mettent à nu de nouvelles parties métalliques sur lesquelles la corrosion peut ainsi continuer son œuvre pernicieuse.

La rouille n'a jamais constitué un attrait. Si certains artistes lui découvrent un aspect intéressant, il faut éviter la confusion entre des considérations esthétiques et des objectifs de conservation. La rouille n'est pas à considérer comme faisant partie intégrante et historique d'un objet industriel. Elle est toujours adventice, contingente, et ne se forme que dans les états d'abandon et de délabrement des objets.

La calamine

Il n'en est pas de même avec la calamine. Celle-ci se forme sur tout produit d'acier laminé à chaud, et fait donc partie intégrante de cet objet et de l'histoire de sa production. Ainsi, les plaques constituant le blindage d'un haut fourneau ont été laminées à environ 1000°C. A cette température, l'air ambiant réagit avec la surface d'acier et génère une peau adhérente, faite d'oxydes particuliers de fer, la calamine justement, dont la couleur varie entre le bleu foncé et le noir. C'est la calamine qui donne sa couleur sombre au blindage de haut fourneau, et sa conservation se justifie.

La patine

Le troisième élément est la patine, un terme qui se réfère à la teinte particulière que peuvent revêtir les métaux plus nobles que le fer, tel le cuivre et l'étain. Si telle monnaie antique en bronze séjourne depuis des millénaires dans tel sol calcaireux de Phénicie, et qu'elle y acquiert au fil du temps une teinte typique et unique, aucun numismate ne décaperait cette patine vénérable. La patine fait partie de l'histoire de cette monnaie. Plus près de nous, les toitures anciennes en cuivre devenues vert-de-gris ont acquis leurs lettres de no-

blesse, et bien sot qui les asticoterait pour les faire briller comme le premier jour.

La rouille qui s'est formée sur les hauts fourneaux et dans le reste du complexe industriel de Belval, ne provient que des années d'abandon. Quel serait l'intérêt de la conserver sauf à montrer aux générations futures que le projet de la conservation des hauts fourneaux a traîné trop longtemps ?

Il est utile dans ce contexte de distinguer trois étapes qui se sont succédées dans la vie des hauts fourneaux :

Le premier état est celui du haut fourneau neuf mis en place par le constructeur et réceptionné par le propriétaire, donc quasiment le jour de sa mise en service.

Le second état est celui après 2-3 décennies de production et au bout de l'une ou l'autre campagne de réfection. A ce moment, l'engin montre des myriades de traces d'usure, de dégâts, d'accidents, de réparations, de modifications transitoires ou définitives, apportées de façon continue par l'exploitant.

Le troisième état est celui, après une décennie d'abandon, quand le haut fourneau et son environnement sont retournés à l'état de friches industrielles. Dans le cas des installations de Belval, cette période d'abandon s'est étendue sur plus de 10 ans. Durant ce laps de temps, les hauts fourneaux et toutes les installations auxiliaires telles les épurateurs de vent, ont commencé à corroder sérieusement, exposés aux intempéries de 40 saisons. Froids et humides la plupart du temps, ils s'enrouillaient avec comme conséquences un changement d'aspect d'un côté, et de l'autre des dégradations corrosives qui menacent la structure

et menaçaient l'intégrité structurelle de l'ensemble.

Pour le restaurateur, il se pose alors la question de savoir lequel des trois états il faudrait conserver pour la postérité ?

Le premier état a basculé à jamais dans le passé et est irrécupérable. Quid alors de conserver le troisième état ? Comment justifier la conservation d'un aspect rouillé qui n'a jamais été le propre du haut fourneau dans sa vie active ?

On peut comparer ce problème à celui de la restauration d'un château médiéval tombé en ruine. Faut-il sauvegarder la mousse et les lichens qui ont poussé sur les murs lors des époques d'abandon, sous prétexte que cette végétation y aurait acquis ses titres d'historicité ? Ne donnerait-on pas dans un faux romantisme ? Mais conserver à grands frais la rouille récente et factice sous prétexte qu'on conserve ainsi le véritable aspect serait identique à garder lesdites mousses et lichens sur des façades lézardées. Non, le seul aspect 'ancien' qu'il convient de conserver, le seul pour qui il faut ouvrir une fenêtre dans le passé est celui qui correspond à l'état 2. Voilà pour les raisons historiques. Mais il y a d'autres priorités, telle celle de la sécurité.

Conclusion : la seule rouille qu'il convient de conserver est celle du second état, celle qui s'est formée pendant l'ère de l'activité industrielle, et certainement pas celle, épaisse de plusieurs millimètres, postérieure à l'arrêt, un épiphénomène sans intérêt.

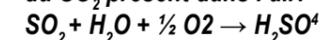
Conserver par endroits la rouille vraiment historique équivaut à laisser ouvert une fenêtre sur le passé, par laquelle le visiteur peut se rendre compte de l'aspect d'antan.

Explications des mécanismes détaillés de la corrosion du fer dans le contexte des hauts fourneaux

La corrosion de l'acier, on l'a vu, est due à la présence d'oxygène, d'humidité et de divers sels qui catalysent l'enrouillage. Les réactions de cette détérioration, comme toutes les réactions chimiques d'ailleurs, sont régies par leurs enthalpies, qui imposent la direction de déroulement et qui décrivent les états d'équilibre. Mais l'état d'équilibre n'est qu'une chose, la cinétique en est une autre. Sous cinétique on comprend la question de savoir si une réaction chimique se déroule lentement ou rapidement, si elle se produit de façon explosive, ou si elle se trouve bloquée, comme le papier qui ne brûle pas spontanément dans l'air, bien que du point de vue thermodynamique, il le devrait. La corrosion du fer et de l'acier, un processus qui normalement devrait se dérouler plutôt lentement, se trouve accélérée par la présence d'un agent catalytique que la civilisation technique fournit à profusion, à savoir le dioxyde de soufre.

Ce sont en effet le SO_2 et les sels qui en dérivent, les sulfates, qui sont les principaux éléments responsables de la corrosion rapide ; toute préservation d'ouvrages historiques en acier doit en tenir compte. Pour mémoire, le dioxyde de soufre est généré pour l'essentiel par la combustion de divers fuels d'origine fossile. Ce gaz est donc omniprésent dans l'atmosphère. Examinons les phénomènes plus en détail :

(1) Formation d'acide sulfurique à partir du SO_2 présent dans l'air :



L'eau, nécessaire au déroulement de la réaction, peut provenir de plusieurs sources :

- les précipitations,

- la condensation suite à des changements de température
- l'humidité adhérente sur des surfaces métalliques froides, sous forme d'un film fin, en provenance de l'atmosphère quand le taux d'humidité dépasse les 50%.

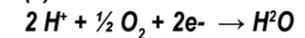
La réaction précitée produit donc, à partir du dioxyde de soufre gazeux, l'acide sulfurique, qui est un agent extrêmement agressif. Comme acide et oxydant, il attaque le fer des structures d'acier et le dissout en sels de fer, en l'occurrence en sulfates de fer, suivant la réaction :

(2) Formation de sulfate de fer (II) suite à l'attaque de l'acide sulfurique :



Il s'agit ici de la première phase de la destruction, la conversion du fer métallique en un sel de fer, par l'acide sulfurique. Le fer est alors dans son état d'oxydation (II). L'autre produit de réaction, l'hydrogène, disparaît rapidement en réagissant avec l'oxygène de l'air pour former de l'eau :

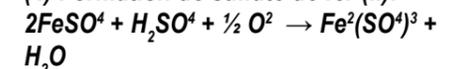
(3) Formation d'eau de réaction :



Les pas 2 et 3 ne sont que les deux parties d'une seule réaction.

Le sulfate de fer (II), cependant, n'a pas fini de réagir avec l'acide sulfurique. Une seconde réaction, initiée par l'acide sulfurique excédentaire, oxyde le sulfate de fer (II) en sulfate de fer (III) :

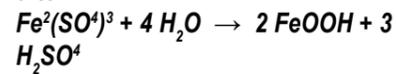
(4) Formation de sulfate de fer (III) :



Ce sulfate de fer (III), dont la formule est $\text{Fe}^{2+}(\text{SO}_4)^3$, est un sel blanc, qui n'est

cependant pas stable vis-à-vis de l'humidité. Il subit rapidement une réaction d'hydrolyse et se convertit en un « Hydroxy-oxyde » de fer (III), et change de couleur :

(5) Formation de la rouille proprement dite:



et c'est ce produit, le Fe(II)OOH, qui constitue la partie essentielle de la rouille, à laquelle il confère d'ailleurs sa couleur rousse.

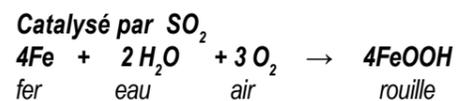
En hydrolysant, le sulfate de fer a libéré l'acide sulfurique.

Et les réactions ne s'arrêtent pas là.

L'acide sulfurique est maintenant disponible pour attaquer une nouvelle molécule de fer métallique, et ainsi de suite. D'où l'effet pervers, catalytique du dioxyde de soufre.

En d'autres termes, par la présence du catalyseur SO_2 , les réactions précitées se déroulent en un cycle infini jusqu'au moment où tout le fer métallique est consommé et converti en rouille.

Pour résumer l'effet des cinq réactions précédentes, on peut les additionner et obtenir comme résultante la réaction globale suivante :



Cette réaction n'est qu'une simplification de la réalité. Si l'oxy-hydroxyde de fer indiqué dans la ligne précédente constitue bien le gros du résultat de la corrosion du fer, il existe également des sels de fer différents, carbonatés ou hydroxycarbonatés, dont la couleur peut varier, ce qui fait que

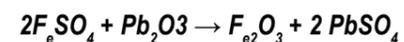
suivant l'environnement, le taux d'humidité, le pH, et encore d'autres facteurs, on trouvera les teintes les plus diverses entre la 'vraie' couleur rouille et des nuances tirant soit sur le brun, le brun foncé, ou encore sur l'orangé.

La formation de la rouille va de pair avec un accroissement du volume des produits d'oxydation. 1 volume d'acier donne lieu à 2 ou 3 volumes de rouille. Cet accroissement de volume fait éclater les couches de protection anciennes qui se perdent par ce processus.

Quelles sont alors les mesures à prendre pour assurer une protection anti-rouille aussi efficace et durable que possible ?

On peut freiner la réaction 5 par deux méthodes :

1. Lors de la première restauration d'un ouvrage en acier, il s'agit d'enlever au maximum l'accumulation des sulfates de fer, de préférence au moyen d'un lavage à haute pression. Cette élimination correspond à une interruption du cycle des réactions précitées. Il est vrai que même si la majeure partie des sulfates est ainsi éliminée, une autre partie risque d'être enfoncée plus profondément dans les crevasses et piqûres de corrosion déjà existantes et de continuer à entretenir la corrosion. Voilà pourquoi il y a lieu de rendre chimiquement inopérants ces restes de sulfates. Le moyen idéal serait l'application d'une couche de minium, ou oxyde de plomb qui réagit de la façon suivante avec les sulfates résiduels :



Contrairement au sulfate de fer, le sulfate de plomb (PbSO_4) est insoluble, et le sul-

fate est sorti du cycle précité. Le minium permet d'interrompre les réactions 2-5 de façon durable. Voilà pourquoi le minium a été utilisé comme sous couche anti-rouille très efficace pendant de si longues années. Malheureusement, le plomb est un métal toxique, ce qui l'élimine comme remède.

2. Le second remède, celui qui a été employé aux Hauts Fourneaux de Belval, a consisté à appliquer du zinc. Le zinc agit par voie électrochimique, en mettant le fer sous-jacent à un potentiel électrique de 1 Volt environ. Notons que ce potentiel de 1 Volt n'est pas apporté par un courant électrique externe, mais par l'action chimique du zinc même. Le zinc métallique est appliqué sous forme d'une poudre métallique fine qui est dispersée dans un enduit époxydique. C'est ce qui est appelé 'primaire' dans le texte du livre. Tout se passe donc comme si le haut fourneau avait été revêtu d'une très fine pellicule de zinc, qui rend l'acier quasiment inerte vis-à-vis de l'attaque des nuisances atmosphériques, et cela même en présence de SO_2 .

© **LE FONDS BELVAL**
1, avenue du Rock'n'Roll
L-4361 Esch-sur-Alzette
Tél.: + 352 26 840-1
Email : fb@fonds-belval.lu
www.fonds-belval.lu



facebook.com/FondsBelval



instagram.com/FondsBelval

Impression: Imprimerie Reka print
Esch-sur-Alzette, septembre 2021