



Technologie révolutionnaire de pulsion d'oxygène pour la production d'acier



De l'essai à l'utilisation industrielle à grande échelle

Rapport d'application par le Dr Rainer Klock et Marcel Mokosch

La société thyssenkrupp AT.PRO tec GmbH est renommée pour avoir développé le processus de pulsion séquentielle. Ce processus fut dans le passé mis en œuvre dans les cubilots afin d'augmenter considérablement leur rentabilité. A l'issue d'une période d'une dizaine d'années de développement avec leur partenaire Schubert & Salzer, le Dr Rainer Klock et l'équipe d'AT.PRO tec sont parvenus à mettre en œuvre cette technologie SIP dans les hauts fourneaux à l'aide de vannes à glissière. L'histoire d'un chercheur se muant en constructeur d'installations.

La longue histoire des hauts fourneaux est jonchée de grandes innovations et d'améliorations techniques. Celles-ci étaient toujours le fruit de courageux pionniers prêts à remettre en question les procédés usuels afin de poursuivre l'optimisation du processus de fabrication de la fonte brute. Ainsi, Abraham Darby parvenait au 18^e siècle à remplacer le charbon de bois par du coke et permettait du coup d'augmenter considérablement la taille et l'efficacité des hauts fourneaux. Au 19^e siècle, Edward Alfred Cowper innovait largement avec les nouveaux réchauffeurs d'air. Les fameux « cowpers » font aujourd'hui partie intégrante de toute installation de hauts fourneaux.

Un autre jalon dans l'évolution des hauts fourneaux est le « processus de pulsion séquentielle avec ondes de choc induites ». La société thyssenkrupp AT.PRO tec GmbH et son directeur actuel le Dr Rainer Klock sont à l'origine de ce procédé SIP. Ils ont développé cette technologie en équipe, pendant plus de 10 ans, de manière qu'elle puisse être mise en œuvre dans les hauts fourneaux. Les employés de la société AT.PRO tec disposent à l'heure actuelle d'une large expertise scientifique et industrielle en matière d'utilisation des gaz dans les processus de fusion.

L'idée à la base de ce nouveau procédé, est d'activer les zones plus profondes à l'intérieur du four. Avec la technologie actuelle, les particules fines qui n'ont pas complètement réagi bloquent le lit de coke : le flux de gaz et la chaleur ne pénètrent du coup pas assez profondément dans le four. Ceci génère un cône de coke également appelé « homme mort ».

La solution : de fortes pulsions discontinues qui permettent la nécessaire action en profondeur de l'oxygène industriel. L'excédent ponctuel d'oxygène permet une réaction chimique plus



Le Dr Rainer Klock de thyssenkrupp AT.PRO tec (à droite) avec Marcel Mokosch de Schubert & Salzer Control Systems (à gauche).

complète des particules fines - même au plus profond dans le lit de coke. Les ondes de choc qui accompagnent les pulsions y brisent les croûtes et y procèdent à un brassage à fortes turbulences. Elles assurent ainsi un flux de gaz plus régulier et un meilleur écoulement du métal liquide et des scories.

Phase 1 : ASIPGO – projet de recherche commun de thyssenkrupp et de la RWTH Aachen (2007-2011)

Cette technologie fonctionne déjà, à petite échelle sur des cubilots, depuis des années et rencontre un succès certain, permettant une augmentation considérable de la rentabilité. Toutefois, une mise en œuvre dans des hauts fourneaux - beaucoup plus grands - ne faisait pas encore l'objet de recherches.

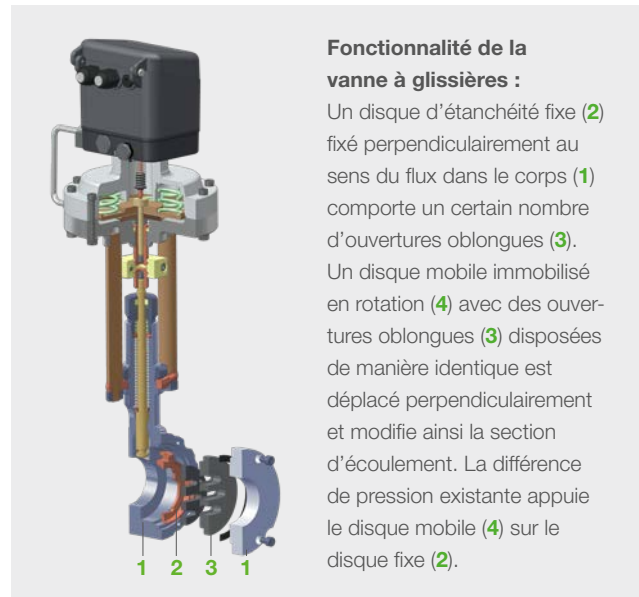
Lorsque la société AT.PRO tec contacta à ce sujet la RWTH Aachen et son Institut de sidérurgie (IEHK), Rainer Klock venait juste de terminer son mémoire. La RWTH recherchait un collaborateur scientifique pour ce nouveau projet soutenu par le partenaire industriel thyssenkrupp. « Ce fut pour moi l'occasion rêvée. Je pouvais non seulement commencer à rédiger ma thèse

de doctorat après avoir obtenu mon diplôme, mais le projet me permettait également de travailler directement sur l'un des plus grands hauts fourneaux en Europe », raconte plus tard le Dr Rainer Klock. « Le projet ASIPGO était censé poursuivre deux objectifs sur trois ans : Tout d'abord, améliorer la mise en œuvre du procédé SIP dans les cubilots par le biais de l'automatisation et ensuite, permettre l'utilisation du procédé SIP dans les hauts fourneaux. »

Pour sa thèse de doctorat, Rainer Klock axa ses recherches sur la mise en œuvre dans les hauts fourneaux. Il fallait tout d'abord étudier les processus physiques et chimiques qui ont contribué au succès du procédé SIP dans les cubilots. Composée d'employés de thyssenkrupp AT.PRO tec, de thyssenkrupp Steel Europe et de la RWTH Aachen, l'équipe de chercheurs voulait saisir les processus dans la zone de tourbillonnement d'un haut fourneau et voir comment l'impacter par des pulsions d'oxygène ; les connaissances ainsi acquises devaient ensuite permettre de transposer cette technologie du cubilot au haut fourneau.

Partant des connaissances acquises à l'IEHK, une installation pilote SIP pour hauts fourneaux fut finalement construite. Par rapport au système SIP pour cubilots, on travaillait désormais avec des diamètres nominaux et des pressions nettement plus importants. Il fallait donc adapter l'installation et l'équiper de composants appropriés. L'accent fut ainsi mis sur les vannes à impulsion. Celles-ci devaient être en mesure de générer une onde de choc aussi forte que possible. Après avoir longuement analysé plusieurs types de vannes, c'est finalement la vanne à glissières de Schubert & Salzer qui s'est imposée.

Le principe de cette vanne était simple au possible : deux disques à fente qui glissent l'un sur l'autre et assurent l'étanchéité l'un contre l'autre. Un disque d'étanchéité fixé perpendiculairement au sens de l'écoulement sur lequel glisse un autre disque mobile avec la même disposition de fentes, modifiant



ainsi la section d'écoulement. La pression différentielle appliquée presse le disque mobile contre le disque fixe et contribue ainsi à l'étanchéité. Ce principe entraîne de brefs temps d'ouverture et une résistance à la pression pour de grands diamètres nominaux, critères qui se sont avérés décisifs.

Phase 2 : de l'essai à l'utilisation industrielle à grande échelle (2011 - 2020)

Les premiers essais avec l'installation pilote SIP dans le haut fourneau Schwelgern 1 ont fourni des résultats si prometteurs que thyssenkrupp Steel Europe a décidé de poursuivre le développement du procédé au-delà du projet de recherche. Avec son diamètre au creuset de 13,6 m, une hauteur totale de 110 m



Schwelgern 1 compte parmi les hauts fourneaux les plus modernes au monde avec une capacité de production potentielle de 10 000 t par jour. 40 dispositifs SIP (gris-bleu sur la photo) ont été installés sur les tuyères au cours du projet, ils injectent de fortes pulsions discontinues d'oxygène industriel dans le lit de coke afin d'atteindre un effet en profondeur optimal.



Les dispositifs SIP sont le fruit de longues années de recherche et développement : depuis les premiers essais à l'Institut de sidérurgie de la RWTH Aachen, la construction et l'optimisation d'un prototype au haut fourneau Schwelgern, jusqu'à l'aménagement de toute l'installation SIP pendant l'exploitation.

et un volume interne de 4 416 m³, le haut fourneau Schwelgern 1 peut produire 10 000 t par jour. La construction en acier soudé est revêtue côté intérieur d'un matériau réfractaire et dispose d'un circuit d'eau de refroidissement fermé ; elle compte parmi les hauts fourneaux les plus modernes au monde. C'est là que Rainer Klock devait diriger le développement du procédé SIP en sa qualité d'ingénieur d'exploitation ; thyssenkrupp Steel Europe l'engagea durant l'été 2010.

L'objectif était, d'une part, de créer un prototype utilisable à l'échelle industrielle sur la base de l'installation pilote SIP. D'autre part, il fallait poursuivre l'optimisation de ce prototype pour le processus. « Afin d'encore optimiser l'efficacité de notre procédé, nous avons commencé à nous consacrer aux ondes de choc afférentes à chaque pulsion », explique le Dr Rainer Klock, entre-temps devenu Docteur en métallurgie. « Nous étions persuadés que ces ondes, tout en faisant partie intégrante du processus SIP, pouvaient contribuer largement à l'optimiser. Nous souhaitons agrandir la zone de tourbillonnement et briser les croûtes dans le lit de coke par le biais d'ondes de choc plus puissantes. Nous augmentons du coup la perméabilité et améliorons l'efficacité du processus de haut fourneau avec de plus grandes surfaces de réaction. »

« L'équipe de projet de la société AT.PRO tec nous avait contactés pour nous expliquer ce qu'ils souhaitaient », raconte Marcel Mocosch, agent technico-commercial chez Schubert & Salzer Control Systems. « Pour créer des pulsions avec des ondes de choc encore plus puissantes, il fallait encore optimiser les vitesses d'ouverture élevées tout en garantissant des temps d'ouverture extrêmement courts. Les vannes à glissières s'imposaient d'emblée comme étant idéales pour une telle application. La course typique entre les positions « Ouverte » et « Fermée » n'est que de quelques 8 mm. Cette course réduite entraîne de très faibles masses en mouvement. Par conséquent, les forces d'entraînement requises sont très faibles et la vanne est en fin de compte plus compacte que la plupart des autres types de vannes. »

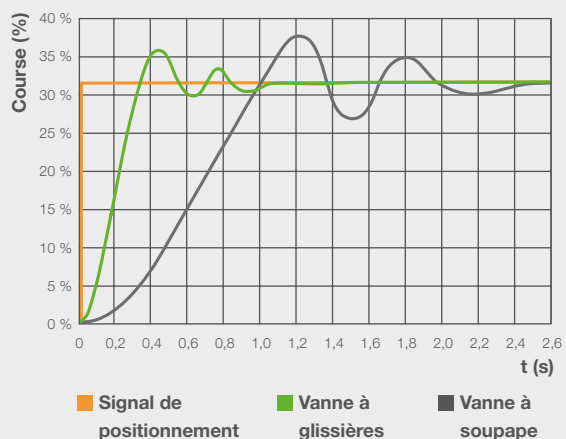
Dans la foulée de cet entretien, le premier « dispositif SIP » - prototype de la nouvelle installation - a fonctionné en continu pendant une période de quatre à cinq ans et a été continuel-

lement optimisé. Au fil du temps, la vanne à glissière utilisée a graduellement mûri avec l'installation et le processus. Plusieurs modifications structurelles ont été apportées en étroite collaboration, puis testées dans la pratique afin d'adapter la vanne aux exigences de l'application.

« En fin de compte, nous sommes parvenus à optimiser la vanne pour atteindre des vitesses d'ouverture record de seulement 2ms. Il était ainsi possible de générer des pulsions qui pénètrent profondément dans le lit de coke avec des ondes de choc littéralement puissantes », explique Marcel Mocosch. « Les vitesses

Dynamisme:

Les vannes de régulation à glissière sont nettement plus rapides que les vannes de régulation conventionnelles. Si l'on compare la course des deux vannes suite à un signal de positionnement, il s'avère que la course courte, les faibles forces de positionnement et le volume compact de l'actionneur des vannes de régulation à glissière entraînent des temps de positionnement plus courts et une amplitude de course nettement plus faible lors de l'amorçage. Cette dynamique élevée a un impact positif sur la qualité de régulation du circuit de régulation.



de commutation extrêmes ainsi que les pressions élevées et la fréquence de commutation très importante ont toutefois poussé la vanne jusqu'à ses limites. À l'époque, ce cocktail d'exigences était pour nous un véritable défi. Mais c'était également une grande opportunité pour mettre la technologie des vannes à glissières à l'épreuve. Pour que les vannes atteignent une longévité acceptable pour l'exploitant dans de telles conditions de fonctionnement extrêmes, il fallait repousser leurs limites mécaniques par le biais de modifications structurelles. L'objectif de longévité déclaré à cet effet était d'un an, ce qui correspond à des millions de commutations. »

En 2015, le moment était enfin venu : thyssenkrupp Steel Europe et thyssenkrupp AT.PRO tec GmbH se lançaient dans le développement, la construction et l'exploitation d'une installation complète de pulsion d'oxygène dans le haut fourneau Schwelgern 1. Les dispositifs SIP furent optimisés dans les années suivantes. Des dispositifs SIP furent installés sur les 40 tuyères du haut fourneau pendant le fonctionnement de ce dernier.



**Vanne GS type 8040 GS3 -
La base d'un partenariat de
développement de longue
date :**

Pendant de nombreuses années, la version standard de la vanne d'arrêt à glissières type 8040 GS3 a été adaptée à plusieurs reprises aux exigences spécifiques de l'application dans les dispositifs SIP, puis testée dans la pratique.

*« Il n'est pas toujours évident de trouver un partenaire de développement aussi persévérant et fiable »
- Dr. Rainer Klock*

Un projet mené à bien

L'installation SIP a finalement été achevée à l'automne 2020. Quarante dispositifs SIP attendaient leur exploitation. Les dispositifs ont été graduellement activés sur une période de plusieurs semaines. Leur impact sur le processus a été suivi de près.

Le procédé SIP a été amorti en moins de deux années d'exploitation du haut fourneau Schwelgern 1 et permet désormais d'économiser plusieurs millions d'euros par an. L'efficacité accrue a entraîné une diminution considérable de la consommation globale d'agents réducteurs (coke et charbon pulvérisé). Ceci se reflète également dans les économies de CO₂ de l'ordre de 50 à 100 kg par tonne de fonte brute produite. Les économies de CO₂ annuelles s'élèvent à plus de 100 000 t.

Le projet complet est, pour thyssenkrupp AT.PRO tec, un immense succès : « Après un fonctionnement continu d'un an, les vannes à glissières de Schubert & Salzer se sont parfaitement montrées à la hauteur des conditions d'utilisation extrêmes de notre application. Le développement commun de longue date



Aperçu de l'intérieur d'un dispositif SIP : deux vannes à glissière de type 8040 ont été optimisées au fil du temps de manière à libérer les pulsions requises avec de fortes ondes de choc et à atteindre une longévité minimum d'un an, ce qui correspond à plusieurs millions de commutations.

avec Schubert & Salzer a largement porté ses fruits. Il n'est pas toujours évident de trouver un partenaire de développement aussi persévérant et fiable », explique le Dr Rainer Klock, aujourd'hui gérant de la société thyssenkrupp AT.PRO tec GmbH. « Pour demain, un de nos projets est de relier directement la technologie SIP et le processus de haut fourneau à l'aide d'un système d'automatisation de niveau 2 afin de permettre des processus encore plus optimisés et automatisés. Mais notre objectif est d'abord de promouvoir le succès mondial de la technologie SIP. »

Lorsque la technologie a été pleinement opérationnelle pour la première fois, thyssenkrupp.AT.PRO tec a décidé qu'un parte-

nariat avec l'un des principaux fournisseurs d'installations et d'équipements de hauts fourneaux serait utile pour atteindre cet objectif. Après plusieurs mois de négociations, un accord mondial exclusif de marketing et de vente a été signé avec Primetals Technologies Ltd. en août 2021. « Notre partenaire fiable Primetals Technologies va commercialiser cette technique dans le monde entier et la rendre accessible à d'autres sidérurgistes. » conclut le Dr Rainer Klock.



Le procédé SIP augmente considérablement l'efficacité de la production de fonte brute, avec des économies annuelles de plusieurs millions d'euros pour le haut fourneau Schwegelm 1 ; il a été amorti en moins de 2 années d'exploitation. Les économies de CO₂ annuelles s'élèvent à plus de 100 000 t.

A propos de thyssenkrupp AT.PRO tec GmbH

thyssenkrupp AT.PRO tec est un fournisseur de technologies innovantes pour l'optimisation des processus de fusion dans les fours à cuve de l'industrie de l'acier et de la fonderie. Nos collaborateurs disposent de plusieurs dizaines d'années d'expérience dans l'utilisation de gaz techniques dans les processus de fusion et autres applications industrielles.



Nos compétences clés sont les services techniques, l'ingénierie, la livraison et l'installation de notre technologie SIP dans les systèmes existants des clients, un ensemble complet proposé par une seule entreprise.

La supériorité de notre technologie a été développée dans le cadre d'un projet de recherche en collaboration avec la science et l'industrie. Le procédé SIP automatisé améliore de manière décisive les cycles de processus de différents types de fours dans les industries les plus diverses.

A propos de Primetals Technologies

Primetals Technologies associe son expertise en matière de conception et de construction d'usines à une grande compétence en ce qui concerne l'optimisation du processus de production d'acier.



La demande mondiale de fer et d'acier est en constante augmentation. Dans le même temps, l'approvisionnement en matières premières de haute qualité et la satisfaction des besoins en énergie peuvent constituer un défi. Dans cet environnement dynamique, les aciéries doivent utiliser toutes les technologies disponibles pour devenir plus vertes et plus respectueuses de l'environnement, et pour améliorer leur empreinte écologique, notamment en termes d'émissions de CO₂.

Dans cette optique, nos derniers domaines d'intérêt comprennent de nouvelles solutions écologiques pour une production d'acier encore plus verte, notamment le procédé SIP (Sequence Impulse Process).

Avec des milliers de références dans le domaine de la sidérurgie et de la construction d'aciéries et de nombreux partenariats dans le monde entier, nous aidons nos clients à fixer de nouveaux objectifs et à façonner leur avenir dans le secteur des métaux.

Allemagne

**Schubert & Salzer
Control Systems GmbH**
Bunsenstrasse 38
85053 Ingolstadt
Allemagne
Tél: +49 841 96 54-0
Fax: +49 841 96 54-5 90
info.cs@schubert-salzer.com

Benelux

**Schubert & Salzer
Benelux BV/SRL**
Poortakkerstraat 91/201
9051 Gent
Belgique
Tél Belgique: +32 / 9 / 334 54 62
Fax Belgique: +32 / 9 / 334 54 63
info.benelux@schubert-salzer.com
Tél Pays-Bas: +31 / 85 / 888 05 72
info.nl@schubert-salzer.com
Tél Luxembourg: +352 / 20 / 880 643
info.lux@schubert-salzer.com

France

**Schubert & Salzer
France SARL**
950 route des Colles
CS 30505
06410 Sophia Antipolis
France
Tél: +33 / 422 84 01 74
info.fr@schubert-salzer.com

Grande Bretagne

**Schubert & Salzer
UK Limited**
140 New Road
Aston Fields
Bromsgrove
Worcestershire
B60 2LE
Grande Bretagne
Tél: +44 / 19 52 / 46 20 21
Fax: +44 / 19 52 / 46 32 75
info@schubert-salzer.co.uk

Inde

**Schubert & Salzer
India Private Limited**
707, Lodha Supremus,
Senapati Bapat Marg, Upper Worli,
Opp. Lodha World Tower
Lower Parel (W)
Mumbai 400 013
Indien
Tél: +91 / 77 38 15 46 61
info.india@schubert-salzer.com

États-Unis d'Amérique

Schubert & Salzer Inc.
4601 Corporate Drive NW
Suite 100
Concord, N.C. 28027
États-Unis d'Amérique
Tél: +1 / 704 / 789 - 0169
Fax: +1 / 704 / 792 - 9783
info@schubertsalzerinc.com
www.schubertsalzerinc.com