

## Voyage dans une lingotière de coulée continue. Mesures laser et électromagnétiques de l'hydrodynamique de l'acier \*

P.H. Dauby, M.B. Assar, G.D. Lawson  
(LTV Steel, USA)

**Des techniques originales de mesure de la vitesse de l'acier en lingotière sont présentées ainsi que les résultats obtenus. Des mesures laser sur modèles à eau sont comparées à des mesures de vitesse de l'acier liquide par capteurs électromagnétiques dans des lingotières à brames industrielles (plus de six mois d'opération continue). Les observations et conclusions sont corroborées par des mesures de profils d'épaisseur de la couche fondue de poudre de coulée continue, des mesures aux rayons X de la distribution des bulles d'argon piégées dans les brames ainsi que des déterminations par sonde électronique de la composition des défauts observés sur acier.**

\* Ce texte a fait l'objet d'une présentation aux Journées Sidérurgiques Internationales 2000 de l'ATS (Paris, 13-14 décembre 2000, session 2).

© La Revue de Métallurgie 2001.

### ■ INTRODUCTION

Durant plusieurs années, LTV Steel a utilisé des modèles à eau pour étudier l'hydrodynamique de l'acier en répartiteurs, en lingotières et en busettes immergées dans le but d'améliorer la propreté de l'acier et de réduire les défauts sur bobines. Les modèles à eau sont faciles à utiliser, permettent de très bien visualiser les mouvements de l'eau et l'entraînement de laitier et sont, pour cette raison, très utiles pour des études paramétriques. Lorsque du gaz est injecté dans les modèles à eau, la similitude entre maquette et lingotière industrielle est cependant compromise. C'est la raison pour laquelle LTV Steel décida, dès 1977, d'explorer d'autres techniques d'investigation de l'hydrodynamique de l'acier. Ce sera l'objectif du présent rapport de décrire ces techniques et d'en présenter les résultats d'utilisation.

### ■ TECHNIQUES UTILISÉES

PIV et MFC sont les deux techniques qui seront présentées dans cet article :

- PIV (Particle Image Velocimetry) est une technique laser de mesure de la vitesse de l'eau qui a été utilisée sur les modèles à eau que la société LTV possède à Independence (échelles 1/1 et 4/10).
- MFC (Mould Flow Control) est une mesure électromagnétique de la vitesse de l'acier liquide qui a été utilisée sur la machine à brames à deux brins de l'usine de Cleveland (rayon : 12 m, longueur métallurgique : 33 m, épaisseur : 230 mm, largeur : de 787 à 1865 mm).

En outre ont été effectuées des mesures par fils fondus de l'épaisseur de la couche de poudre de coulée continue, des mesures aux rayons X de la distribution des bulles d'argon piégées dans les brames ainsi que des déterminations par sonde électronique de la composition des défauts observés sur acier.

### ■ RÉSULTATS

Les motifs de la présente étude sont repris ci-dessous et couvrent quatre sujets :

- déterminer dans quelle mesure les modèles à eau simulent bien les conditions de coulée en lingotières industrielles ;

## PIV and MFC measurements in a continuous caster mould. New tools to penetrate the caster black box

P.H. Dauby, M.B. Assar, G.D. Lawson  
(LTV Steel, USA)

### Objectives

Four objectives are presented in this paper :

- determine to what extent water models reflect actual casting operations ;
- determine the predictability of the steel flow in the caster moulds ;
- determine to what extent steel flow pattern and velocity affect slab quality ;
- identify the main parameters/ countermeasures that impact slab/coil quality.

### Experiments

The two technologies that were investigated during this research programme are Particle Image Velocimetry (PIV) and Mould Flow Control (MFC) :

- PIV is a powerful laser-based technology that was used on the LTV 0.4 and full-scale water models to determine water velocities in various simulations of casting conditions ;
- MFC sensors are magnetic sensors that were installed on the LTV Cleveland-East 2-strand slab caster to measure actual liquid steel velocities.

In addition, nail boards, X-ray and SEM analyses were extensively used :

- nail boards (steel/aluminum nails inserted into the liquid steel) were used to determine steel meniscus profiles and mould powder/molten slag layer thicknesses during casting ;
- X-ray analysis was used to determine gas bubble/pinhole locations/densities in as-cast slabs ;

- defect samples were analyzed using Scanning Electron Microscopy to confirm the steelmaking origin of the defects observed (defective coils were re-inspected at slow speed).

### Conclusions

- Water model (PIV data) and actual mould results (MFC data) are only identical in zero-gas casting conditions, making it difficult to use water modelling for caster operation optimization.
- Steel flow in the mould is highly turbulent.
- Parameters such as casting speed, argon flow, slab width and SEN depth significantly affect steel meniscus velocity and flow pattern (single or double roll).
- High argon flows (particularly at slow speeds) and transitory casting conditions such as SEN clogging, casting speed changes and tundish changes have a great impact on flow stability.
- It typically takes two to four minutes following a casting speed change for the steel velocities to stabilize at the new level. After a tundish fly, it may take up to fifteen minutes for the steel flow to re-stabilize.
- Steel quality (slivers and pencil pipe) is related to flow pattern and flow stability, two items that are not directly predictable from the usual quality event alarms.
- Overall steel quality improvement requires low gas flow rates and steady casting conditions, making argon reduction and clogging elimination the primary goals of any optimization programme.

- déterminer s'il est possible de prédire les mouvements de l'acier en lingotière à partir des conditions de coulée ;
- déterminer dans quelle mesure les mouvements de l'acier affectent la qualité du produit fini ;
- déterminer quels paramètres et conditions de coulée sont favorables à l'amélioration de la qualité des brames et des bobines.

### Mesures PIV (laser) sur maquettes

Dans la technique PIV, un laser combiné à une caméra rapide (30 vues par seconde) est utilisé pour mesurer la vitesse de

l'eau ainsi que des bulles de gaz qu'elle peut contenir. Les vecteurs de vitesses ainsi déterminés sont ensuite utilisés pour construire les trajectoires suivies par l'eau et les bulles de gaz.

La *figure 1* schématise les deux types de trajectoire habituellement observés. Dans la trajectoire de type « double-roll », l'eau (ou l'acier) heurte d'abord les petites faces de la lingotière et se divise ensuite en deux boucles. Il en résulte qu'en surface de lingotière les vecteurs vitesses sont dirigés depuis les petites faces vers la busette immergée (SEN). Dans la trajectoire de type « single-roll », l'eau (ou l'acier) monte d'abord vers le ménisque et les vecteurs vitesses au ménisque sont alors dirigés de la busette vers les petites

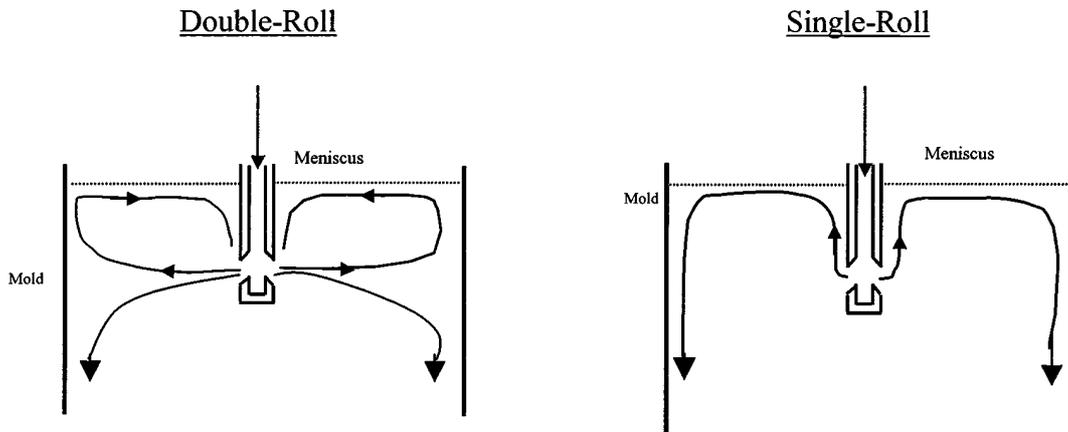


Fig. 1 – Deux trajectoires typiques de l'acier.

Fig. 1 – Schematic representation of the two most typical flows that will be discussed in this paper.

faces. Dans la suite de cet article, les vecteurs vitesses allant de la gauche vers la droite seront considérés positifs, tandis que ceux allant de la droite vers la gauche seront considérés négatifs.

La figure 2 indique que les trajectoires « double-roll » sont typiques des conditions pour lesquelles aucun gaz n'est injecté en lingotière (plus précisément dans l'ensemble réfractaire de répartiteur/busette). Si beaucoup de gaz est utilisé, la trajectoire « single-roll » est plus typique (fig. 3). L'effet de l'injection de gaz est donc de soulever l'eau (et le

métal), de redresser leur trajectoire, et de les faire remonter vers la surface de la lingotière ; ceci d'autant plus rapidement qu'il y a plus de gaz. Il est à noter que l'injection de gaz, en plus de son effet sur la trajectoire de l'eau, rend également les écoulements plus turbulents et plus désordonnés (fig. 4), un phénomène qui sera confirmé dans la suite de cet article lorsque nous décrirons les résultats MFC de mesures réelles de vitesse de l'acier liquide en lingotière industrielle.

La figure 5 indique qu'en plus du débit de gaz injecté en lingotière, le débit de la machine et la largeur des brames

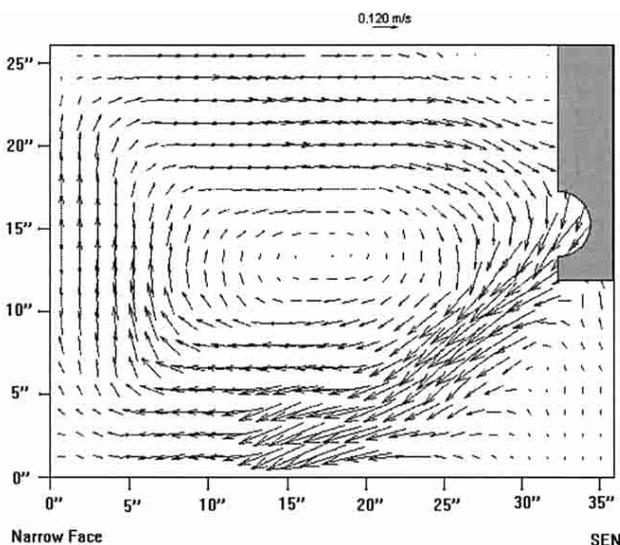


Fig. 2 – Mesures PIV. Modèle à eau (brames de 1854 mm ; 1,016 m/min, sans argon). Sans injection de gaz, les trajectoires sont de type « double-roll » ; les vecteurs vitesses au ménisque sont dirigés vers la busette immergée.

Fig. 2 – PIV measurements. Water velocities (73-inch wide slabs ; 40 ipm, zero gas). Double-roll is the typical flow pattern without gas injection ; meniscus velocities are directed toward the SEN.

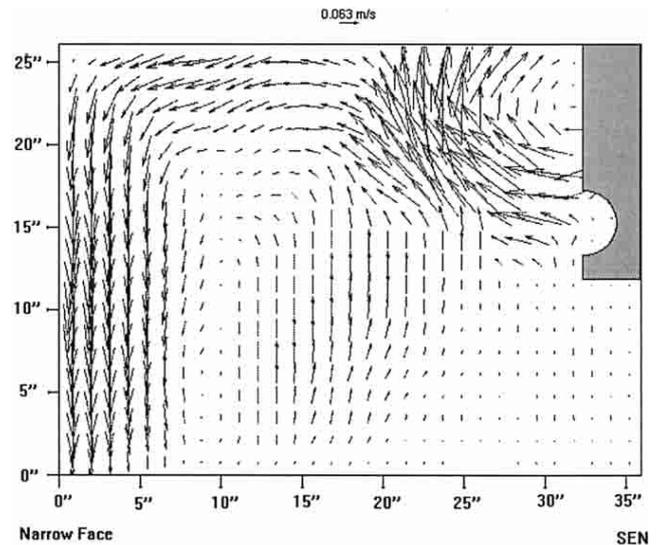
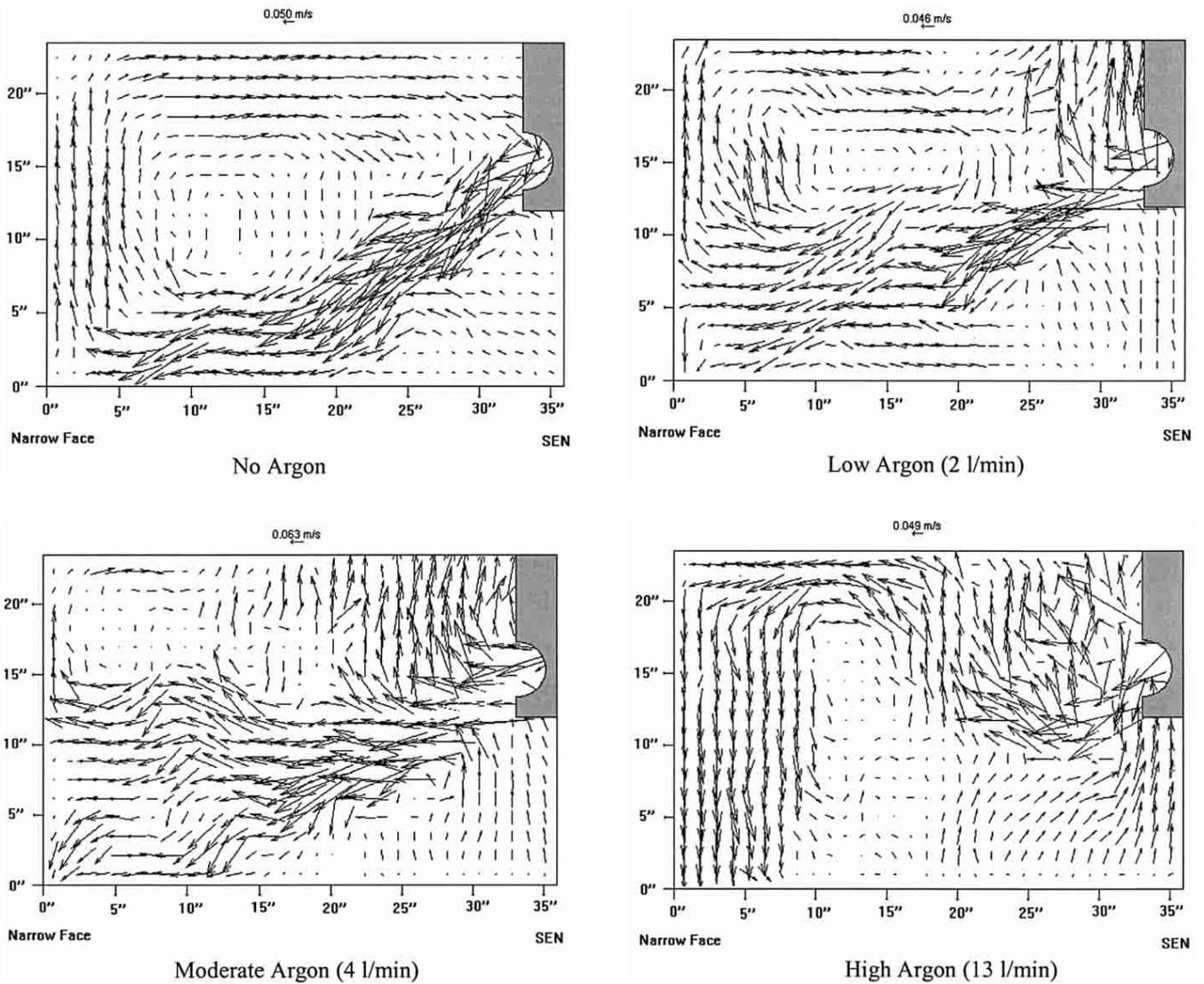


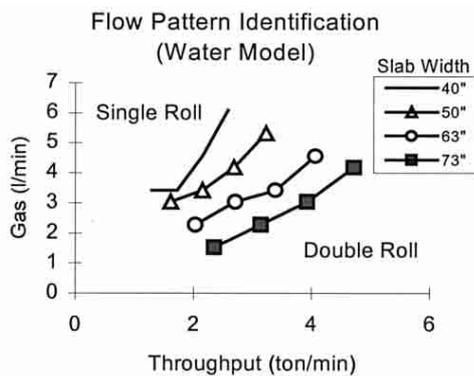
Fig. 3 – Mesures PIV. Modèle à eau (brames de 1854 mm ; 1,270 m/min ; 9 l/min d'air). Lorsque du gaz est injecté en lingotière, les trajectoires sont de type « single-roll » ; les vecteurs vitesses au ménisque sont dirigés vers les petites faces.

Fig. 3 – PIV measurements. Water velocities (73-inch wide ; 50 ipm ; 9 l/min air). Single-roll is the typical flow pattern when gas is used ; meniscus velocities are directed away from the SEN.



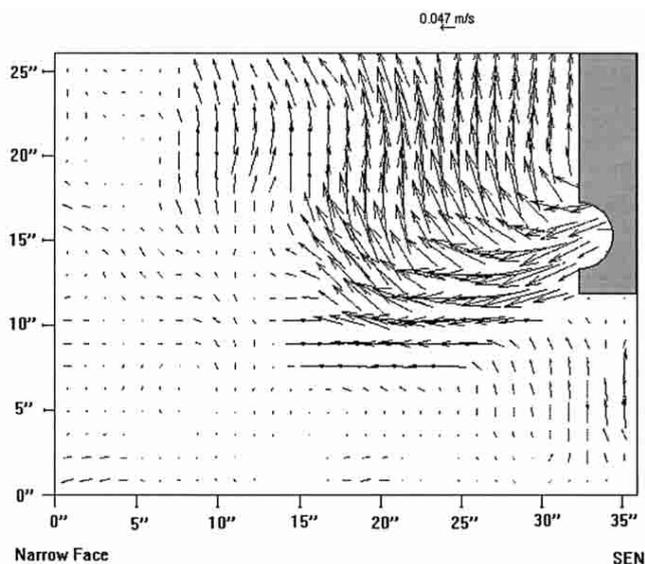
**Fig. 4 – Mesures PIV (brames de 1854 mm ; 1,270 m/min ; avec ou sans injection de gaz).  
L'injection de gaz rend l'écoulement d'eau plus turbulent et fait passer  
le type de trajectoires de « double-roll » à « single-roll ».**

Fig. 4 – PIV measurements. Water velocities (73-inch wide ; 50 ipm).  
Injection of gas makes the flow more turbulent and causes transition from double-roll to single-roll flow pattern.



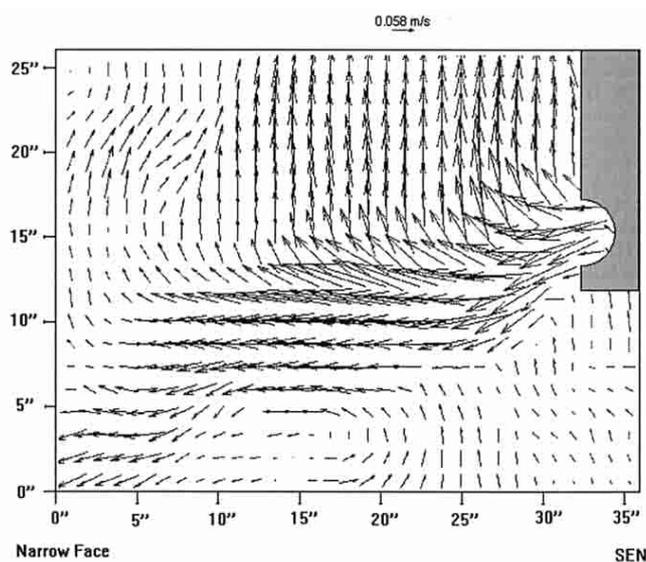
**Fig. 5 – Mesures sur modèle à eau.  
Visualisation des trajectoires avec grilles  
de fils : les trajectoires de l'eau sont fonction  
de la vitesse de coulée, de la largeur des  
brames et du débit de gaz.**

Fig. 5 – Water modelling string measurements :  
single/double-roll flow pattern is clearly  
a function of machine throughput,  
gas consumption, and slab width.



**Fig. 6 – Mesures PIV. Vitesse des bulles d'air (brames de 1854 mm ; 0,889 m/min ; 3 l/min) ; à basses vitesses de coulée, les bulles d'air remontent près de la busette.**

Fig. 6 – PIV measurements. Bubble velocities (73-inch wide ; 35 ipm ; 3 l/min) ; at low casting speed, gas bubbles float out close to the SEN.



**Fig. 7 – Mesures PIV. Vitesse des bulles d'air (brames de 1854 mm ; 1,066 m/min ; 3 l/min). Lorsque la vitesse de coulée augmente, les bulles d'air peuvent atteindre les petites faces et être entraînées dans le bas de la lingotière.**

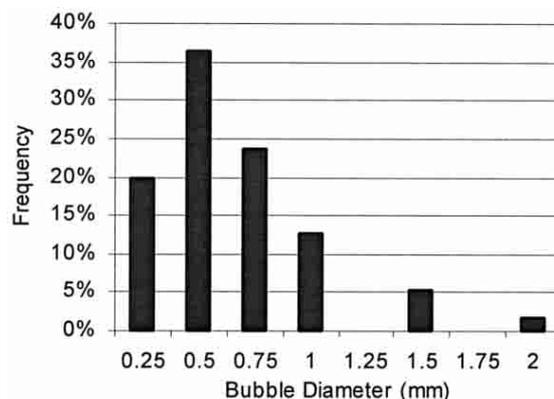
Fig. 7 – PIV measurements. Bubble velocities (73-inch wide ; 42 ipm ; 3 l/min). When casting speed increases, gas bubbles disperse, may reach the narrow faces, and be entrained deep into the mould.

influencent également les trajectoires en lingotière. Ceci est dû à ce que l'on pourrait appeler un effet « petite-face » : lorsque la largeur des brames diminue, l'eau (ou l'acier) heurtera les petites faces avec plus de force ; il rebondira dès lors plus violemment et créera deux boucles.

Indépendamment des écoulements de l'eau, les mesures PIV permettent également de suivre les trajectoires parcourues par les bulles d'air ou d'argon et de déterminer leurs vitesses. Ainsi, à basses vitesses de coulée (fig. 6), les bulles de gaz ont tendance à s'échapper à la verticale de la busette immergée. A grandes vitesses au contraire (fig. 7), les bulles de gaz sont entraînées avec le flot d'eau (ou d'acier) et peuvent même atteindre les petites faces. La profondeur à laquelle une bulle de gaz sera entraînée ensuite dans la brame dépend de sa vitesse de remontée qui, elle-même, dépend de son diamètre. Seules les grosses bulles, de diamètre suffisant, remonteront en surface ; les autres seront entraînées vers le bas dans le puits d'acier liquide. Ceci est une condition que nous ne savons pas simuler dans nos modèles à eau parce que la dimension des bulles d'argon varie grandement (fig. 8).

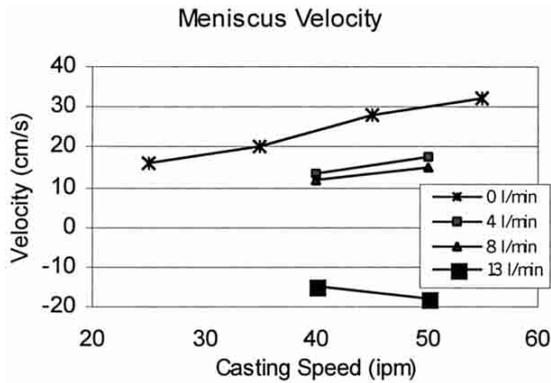
En ce qui concerne les vecteurs de vitesse PIV, tant les vitesses en ménisque que celles près des petites faces se corrèlent bien avec les vitesses de coulée (fig. 9 et 10). L'injection de gaz en lingotière réduit ces vitesses en modifiant progressivement les trajectoires de l'eau, les faisant passer de « double-roll » à « single-roll ». Le bouchage de busette augmente les vitesses aux petites faces (fig. 11) et,

au ménisque, conduit à la formation de vortex (fig. 12), un phénomène qui n'est jamais observé avec des busettes propres. L'effet d'un bouchage de busette sera dès lors une détérioration nette de la qualité de l'acier combinée à une augmentation sévère du nombre de bulles de gaz capturées dans les dix premiers millimètres de la couche d'air solidifié (fig. 13).



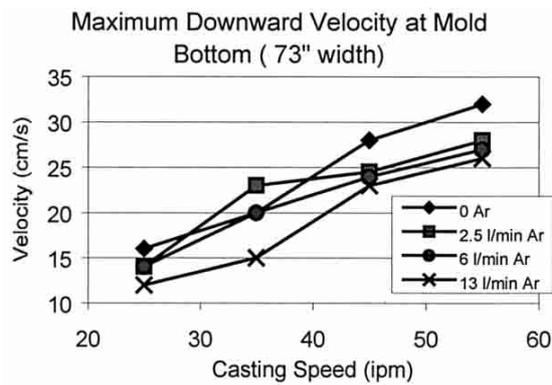
**Fig. 8 – Mesures aux rayons X sur brames industrielles (brames de 1752 mm ; 0,889 m/min ; 6,5 l/min). La dimension des bulles d'argon est très variable.**

Fig. 8 – X-ray measurements (69-inch wide ; 35 ipm ; 6.5 l/min). Argon bubble size varies greatly and makes water modelling/simulation difficult.



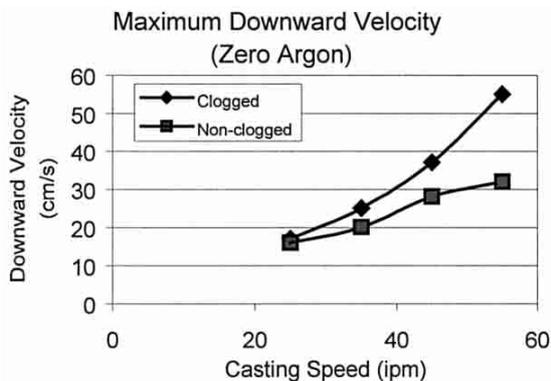
**Fig. 9 – Mesures PIV. Les vitesses au ménisque varient avec la vitesse de coulée ; des vecteurs vitesses négatifs indiquent un écoulement de type « single-roll ».**

Fig. 9 – PIV measurements. Meniscus-velocities vary with casting speed ; negative values denote single-roll flow.



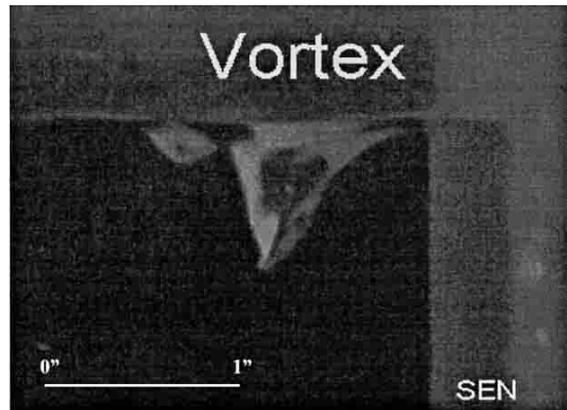
**Fig. 10 – Mesures PIV. Les vitesses verticales vers le bas, près des petites faces, augmentent avec la vitesse de coulée et diminuent lorsque le débit de gaz augmente.**

Fig. 10 – PIV measurements. Downward-velocities (near the narrow faces) increase when casting speed is increased and slightly decrease when gas flow rate is increased.



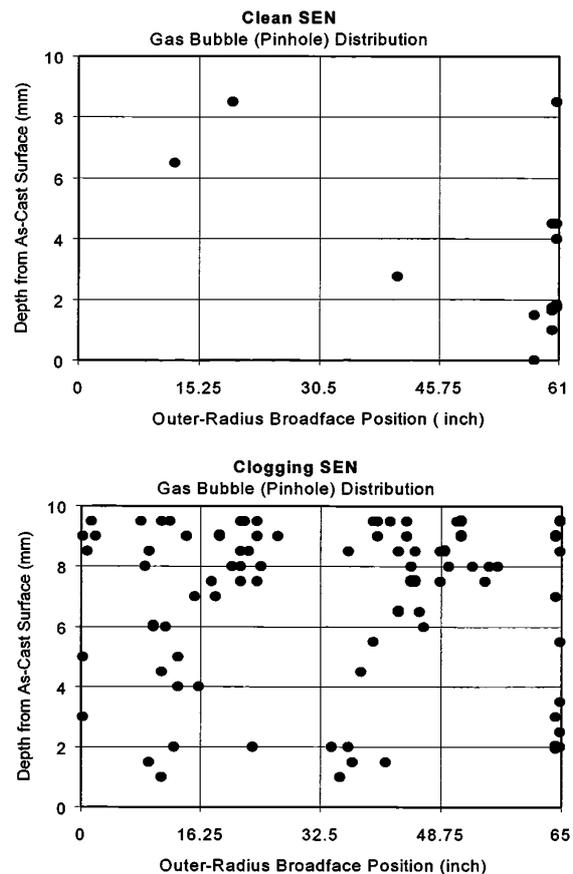
**Fig. 11 – Mesures PIV. Le bouchage des busettes augmente les vitesses verticales vers le bas.**

Fig. 11 – PIV measurements. SEN clogging (50 % port/bore) increases downward velocities.



**Fig. 12 – Mesures sur modèle à eau : en cas de bouchage des busettes, le jet d'eau heurte les petites faces plus haut, déstabilise les vitesses en surface de lingotière et favorise la formation de vortex.**

Fig. 12 – Water modelling. SEN clogging (50 % port/bore) makes the water jet hit higher on the narrow face, destabilizes the meniscus velocities and promotes vortexing.



**Fig. 13 – Mesures aux rayons X sur brames industrielles (brames de 1549-1651 mm ; 0,914 m/min ; 6,5 l/min). Le bouchage des busettes favorise le piégeage des bulles d'argon dans le premier lard de solidification.**

Fig. 13 – X-ray measurements (61-65-inch wide ; 36 ipm ; 6.5 l/min). Clogging dramatically increases entrapment of argon bubbles in the first 10-mm of solidified shell.

## Mesures MFC (électromagnétiques) en lingotières industrielles

Les capteurs MFC sont des aimants permanents très puissants que l'on monte sur les faces des lingotières de coulée continue (fig. 14). Ils créent dans l'acier des champs magnétiques qui, combinés avec les mouvements de l'acier, induisent des courants électriques qui, à leur tour, peuvent être mesurés et transformés en vecteurs vitesses de l'acier. Dès février 1997, LTV Steel équipa l'une de ses machines de coulée continue de huit de ces capteurs. En août 1998, une seconde lingotière équipée de deux capteurs fut mise en service, pour une utilisation combinée équivalente à six mois de production permanente.

La figure 15 indique qu'en l'absence de tout gaz injecté dans la lingotière (c'est le cas d'aciers traités au calcium), « double-roll » est la trajectoire typiquement suivie par l'acier liquide. Dans ce cas, la vitesse de l'acier au ménisque répond bien aux changements de vitesse de coulée imposés (fig. 16) ; cependant, l'on constate qu'il faut attendre plus de deux minutes après un changement de vitesse d'extraction pour que la vitesse au ménisque atteigne et se stabilise à un nouveau niveau. « Single-roll » est la trajectoire typique lorsque de grandes quantités de gaz (argon) sont utilisées (fig. 17). A nouveau, on observe, dans ce cas, qu'il faut près de deux minutes au système pour se stabiliser au nouveau niveau. Connaître le type de trajectoire suivie par l'acier est bien plus qu'une curiosité académique : ainsi que le montrent les figures 18 et 19, il détermine en effet le profil d'épaisseur de la couche fondue de poudre de coulée continue, c'est-à-dire, en fait, la qualité de la lubrification en lingotière, la profondeur des rides d'oscillation et autres paramètres de coulée. En « double-roll », l'épaisseur de la couche fondue de poudre sera plus mince près des petites faces ; en « single-roll », la couche de poudre fondue sera plus mince près de la busette immergée.

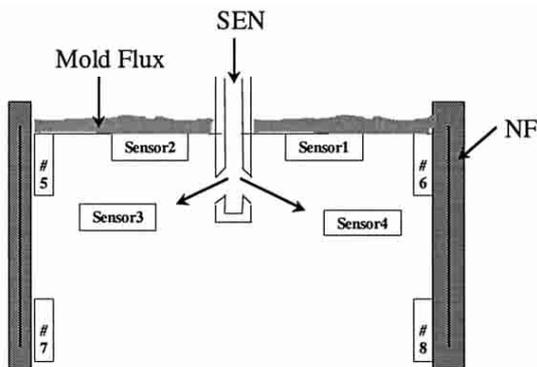


Fig. 14 – Mesures MFC. Position des capteurs de mesure (quatre sur la grande face arrière ; deux sur chacune des petites faces).

Fig. 14 – MFC measurements. Location of the MFC sensors (4 sensors on back broad face and 2 sensors on each narrow face).

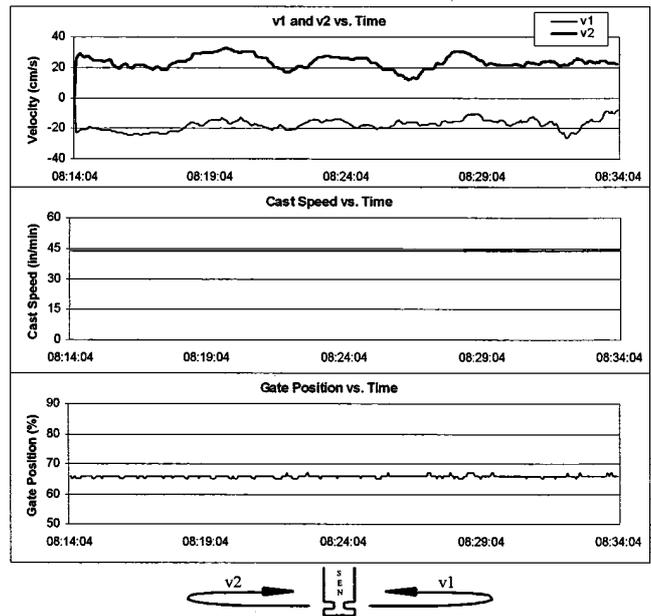


Fig. 15 – Mesures MFC (brames de 1422 mm ; 1,143 m/min ; acier traité au calcium). « double-roll » est la trajectoire typique de l'acier en absence de tout argon.

Fig. 15 – MFC measurements (56-inch wide, 45 ipm, calcium-treated). Double-roll is the typical steel flow pattern when no argon is used.

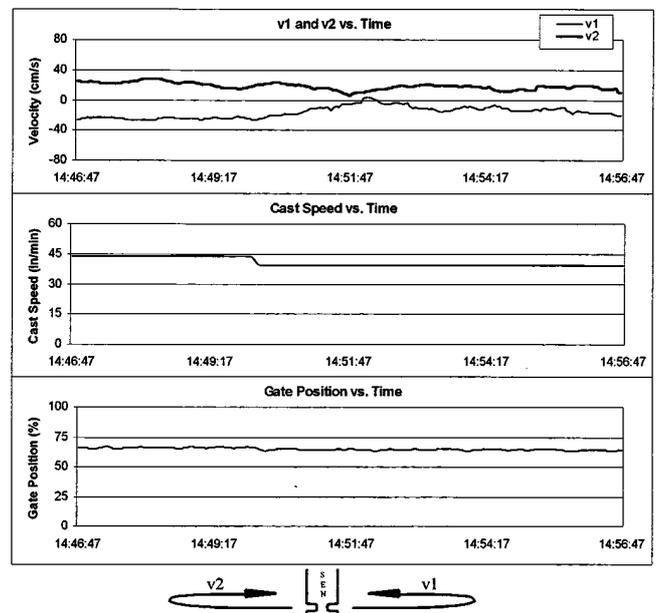
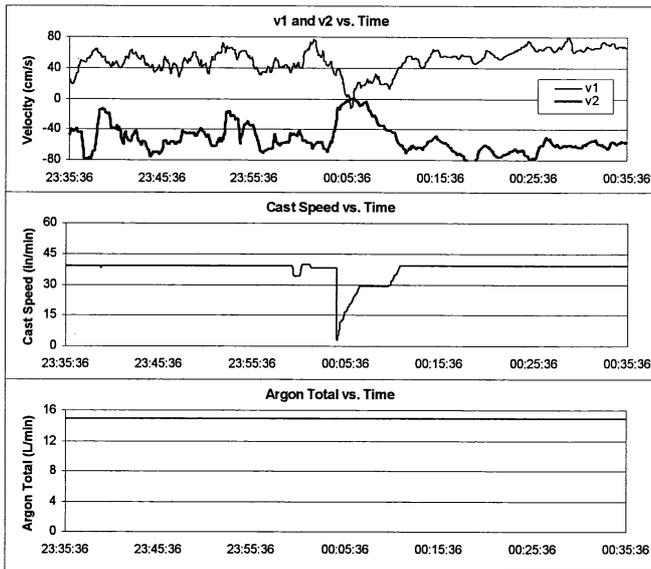


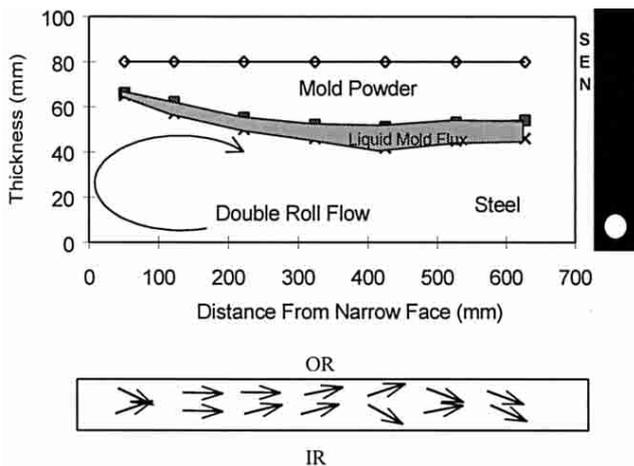
Fig. 16 – Mesures MFC (brames de 1422 mm ; de 1,143 à 1,016 m/min ; acier traité au calcium). Les vitesses au ménisque répondent bien à des variations de vitesse de coulée.

Fig. 16 – MFC measurements (56-inch wide, 45 to 40 ipm, calcium-treated). Meniscus velocities respond well to casting speed changes ; it typically takes two minutes after a casting speed change for the steel velocities to stabilize at the new level.



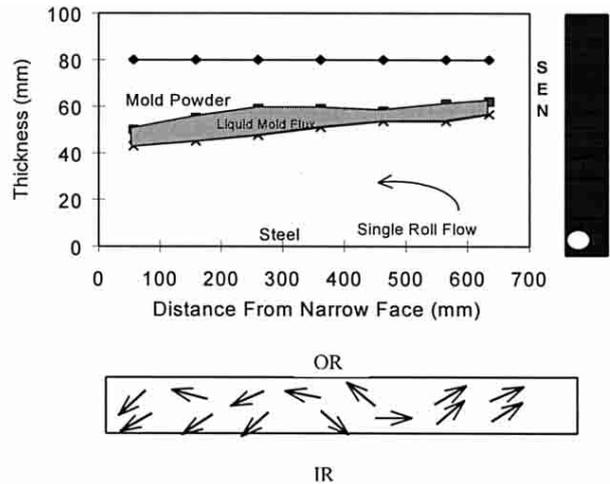
**Fig. 17 – Mesures MFC (brames de 1320 mm ; 1,016 m/min ; 15 l/min). « Single-roll » est la trajectoire typique de l'acier lorsque de grandes quantités d'argon sont injectées en lingotière. Après un changement de vitesse, il faut plus de deux minutes à l'acier pour se restabiliser.**

Fig. 17 – MFC measurements (52-inch wide ; 40 ipm ; 15 l/min argon). Single-roll flow pattern is the typical steel flow pattern at high argon flows. Meniscus velocities respond to casting speed changes ; it typically requires two minutes following a casting speed change for the steel velocities to restore to their previous level.



**Fig. 18 – Mesure du profil d'épaisseur de la poudre de couverture (brames de 1676 mm ; 1,219 m/min ; 13 l/min). Lorsque les trajectoires sont du type « double-roll », l'acier heurte violemment les petites faces de la lingotière, remonte localement le ménisque et réduit d'autant l'épaisseur de la poudre fondue.**

Fig. 18 – Nail board measurements (66-inch wide ; 48 ipm, 13 l/min). With double-roll flow, steel hits the narrow faces where it creates a standing wave ; at that point the molten slag layer thickness is reduced.



**Fig. 19 – Mesure du profil d'épaisseur de la poudre (brames de 1549 mm ; 0,939 m/min ; 6,5 l/min). Lorsque les trajectoires sont du type « single-roll », c'est près de la busette qu'il y a un amincissement de la couche de poudre.**

Fig. 19 – Nail board measurements (6-inch wide ; 37 ipm ; 6.5 l/min). With single-roll flow, the molten slag layer is thinner close to the SEN.

En accord avec la tendance observée lors des mesures PIV sur maquette selon laquelle l'injection de gaz en lingotière modifie progressivement les trajectoires de l'eau et les fait passer de « double-roll » à « single-roll », on observe en lingotière industrielle également que les trajectoires suivies par l'acier liquide sont fortement influencées par l'injection d'argon (fig. 20). Il est intéressant à ce sujet d'examiner la figure 21 qui est relative à des coulées pendant lesquelles l'argon a été remplacé par de l'azote. Ici également on observe que les injections d'azote font passer les trajectoires de l'acier de « double-roll » à « single-roll » démontrant que, contre toute attente, l'azote ne se dissout pas immédiatement dans l'acier. Les mesures MFC démontrent de plus que l'écoulement de l'acier devient extrêmement turbulent et aléatoire lorsque le débit d'argon augmente. En l'absence d'argon, les mesures PIV et MFC sont identiques et se corrént très bien avec les vitesses de coulée (fig. 22). A grand débit d'argon par contre, les vitesses de l'acier sont très instables et ne se corrént plus du tout avec les vitesses d'extraction (fig. 23), a fortiori, avec les mesures sur maquettes qui sont toujours très reproductibles.

## Instabilités d'écoulement – Causes de défauts sur acier

Les figures 24 à 27 résument les observations les plus pertinentes (et sans doute les plus surprenantes) faites durant les campagnes de mesure MFC relativement à la qualité de l'acier élaboré. La conclusion de ces diagrammes est que, alors que chaque condition de coulée prise séparément ne peut pas bien être mise en relation (ou pas du tout) avec les

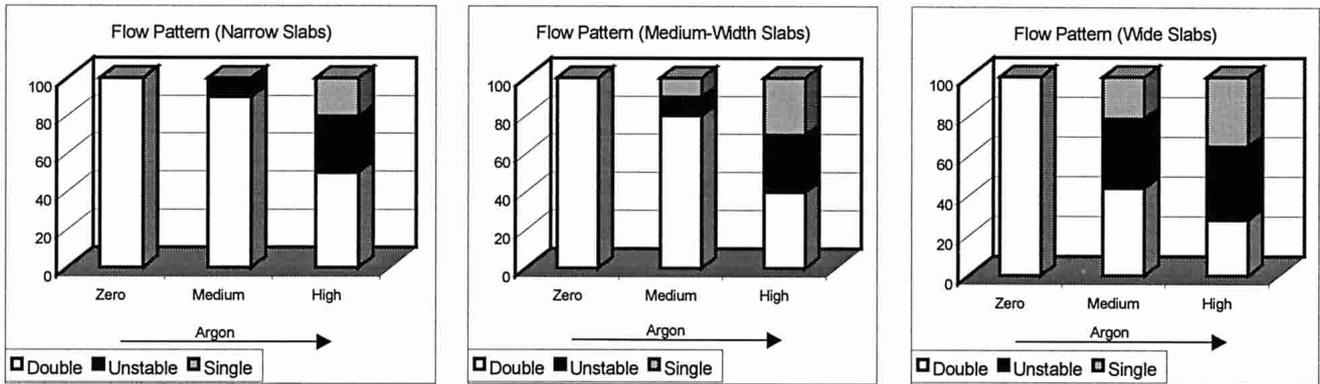


Fig. 20 – Mesures MFC. Plus le débit d'argon est élevé, plus l'écoulement de l'acier est perturbé.

Fig. 20 – MFC measurements. The higher the argon flow, the more unsteady the steel flow pattern becomes.

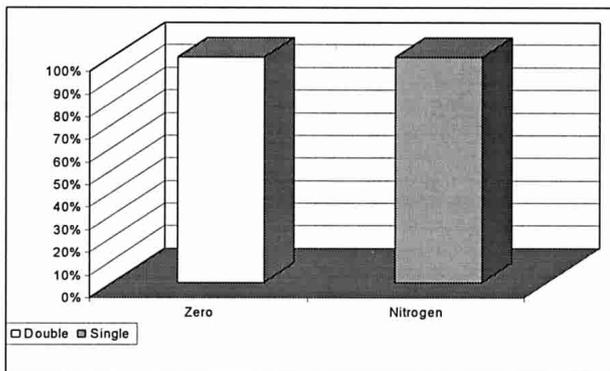


Fig. 21 – Mesures MFC (brames de 1752 mm ; 1,220-1,320 m/min ; 150 mm de profondeur d'immersion ; coulées sans argon comparées à des coulées avec 18 l/min d'azote). L'injection d'azote favorise les trajectoires de type « single-roll ».

Fig. 21 – The injection of nitrogen (similarly to argon) makes the steel flow pattern become single-roll proving that nitrogen does not immediately dissolve in the liquid steel.

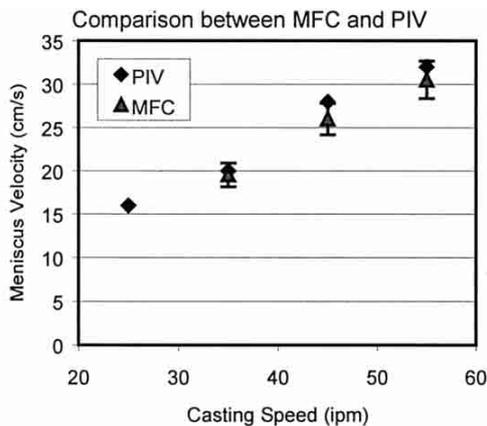


Fig. 22 – Mesures PIV & MFC (brames de 1854 mm ; sans argon). En l'absence d'argon, les vitesses de l'acier liquide au ménisque sont identiques à celles mesurées sur modèle à eau.

Fig. 22 – PIV/MFC measurements (73-inch wide, zero argon). When no argon is used (calcium-treated grades), PIV and MFC meniscus velocities are identical and correlate with casting speed.

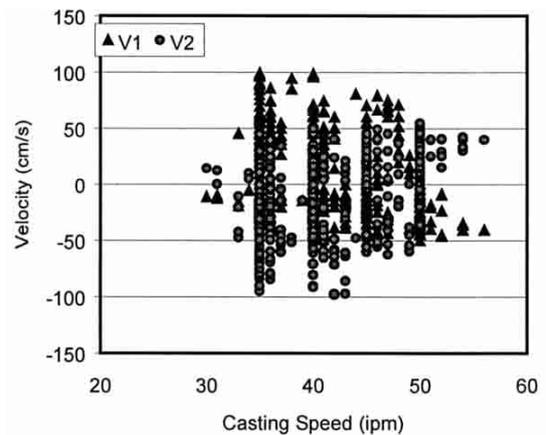
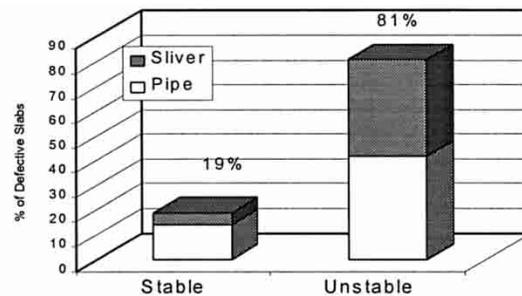


Fig. 23 – Mesures MFC (brames de 1828 mm ; 13 l/min). À débit d'argon élevé, les vitesses de l'acier sont très instables et ne sont plus corrélées avec les mesures sur maquette.

Fig. 23 – MFC measurements (72-inch wide ; 13 l/min argon). At high argon flows, steel velocities are extremely unstable and do not correlate with casting speed.

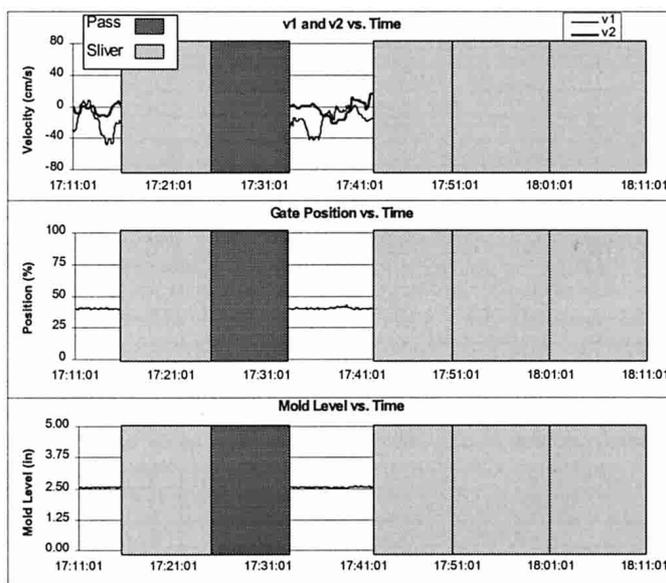
défauts sur acier, les conditions de coulée prises dans leur ensemble, sous la forme d'un type d'écoulement particulier de l'acier, sont au contraire très bien corrélées avec les défauts sur acier (fig. 24).

La figure 25 est relative à la première heure de coulée avec un répartiteur neuf. On y voit des vitesses de ménisque très instables alors que les variations de niveau sont dans les limites normales ( $\pm 1,5$  mm) de même que toutes les autres conditions de coulée. Cependant, quatre bobines produites durant cette heure d'écoulement instable, ont dû être rejetées pour exfoliations (inclusions d'aciérie en surface). Cette situation contraste singulièrement avec les deux heures de coulée suivantes (fig. 26) pendant lesquelles, pour apparemment aucune raison, les écoulements en lingotière sont redevenus stables et aucune bobine n'a dû être rejetée.



**Fig. 24 – Mesures MFC (74 brames de 1854 mm ; 0,889 m/min ; 6.5 l/min). Plus les trajectoires de l'acier sont instables, plus grandes sont les chances de former des défauts sur brames.**

Fig. 24 – MFC measurements (74 slabs ; 73-inch wide ; 35 ipm ; 6.5 l/min). The more unstable the steel flow pattern, the higher the probability of forming defects.

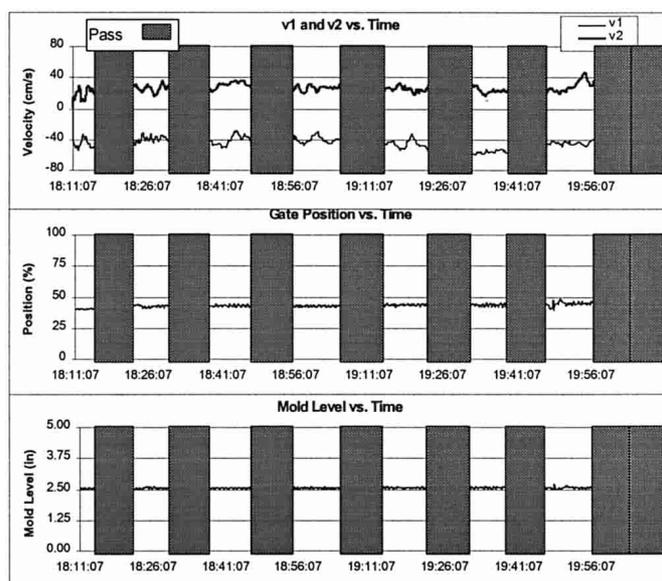


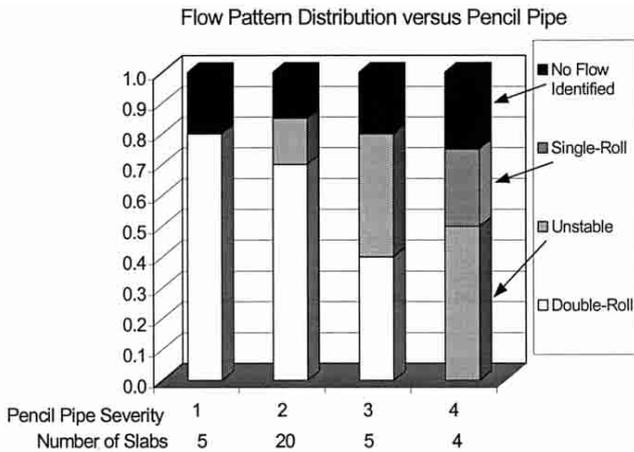
**Fig. 25 – Mesures MFC. Première heure de coulée sur un répartiteur neuf (bonne régulation de niveau ; sans bouchage de busette). Les trajectoires de l'acier sont très instables : quatre coils sur cinq ont été rejetés pour exfoliations.**

Fig. 25 – MFC measurements. Surprising turbulent steel flow during the first hour of casting on a new tundish ; good mould level control ; no clogging ; but confirmed steelmaking slivers were formed on four out of five slabs inspected (lightly shaded areas = defective slabs).

**Fig. 26 – Mesures MFC. Seconde heure de coulée (les trajectoires de l'acier se sont restabilisées). Plus aucun défaut n'a été observé.**

Fig. 26 – MFC measurements. Second hour of casting ; steel flow has stabilized ; no slivers formed (darkly shaded areas = inspected defect-free slabs).





**Fig. 27 – Mesures MFC (brames de 1854 mm ; 1,016 m/min ; 6,5 l/min). Plus l'écoulement de l'acier est instable et perturbé, plus il y a de risque de former des défauts dits boursoufflures.**

Fig. 27 – MFC measurements (73-inch wide ; 40 ipm ; 6.5 l/min). The more unstable the steel flow pattern, the higher the probability of forming pencil-pipe defects.

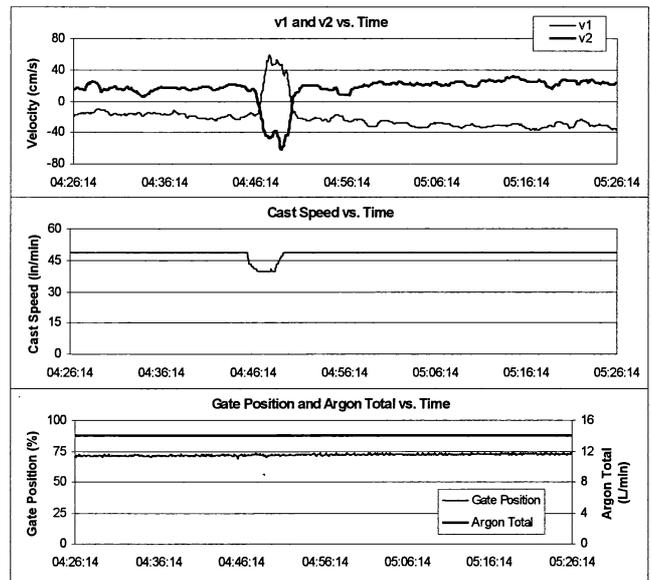
La figure 27 est relative à des défauts dits boursoufflures (inclusions d'aciérie attachées à une bulle d'argon) observés sur un groupe de 34 brames coulées dans des conditions « absolument identiques ». On y observe que quoique les conditions de coulée aient été totalement identiques, l'écoulement de l'acier a été différent. En outre, plus le type d'écoulement est instable, plus le risque de former des défauts est élevé.

### Causes des instabilités d'écoulement de l'acier

Le type d'écoulement en lingotière semblant être le paramètre déterminant pour la qualité de l'acier, nous essayerons ci-dessous de présenter quelques exemples de situations de coulée à éviter.

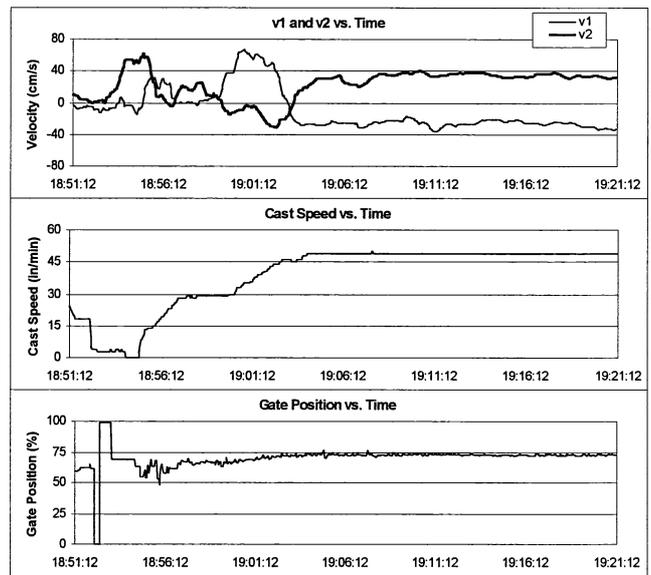
La figure 28 indique que tout changement de vitesse d'extraction affecte le mode d'écoulement de l'acier en lingotière et que près de quatre minutes (ou le temps de couler une demie brame) peuvent être nécessaires pour retrouver la stabilité. Les modifications de vitesse qui accompagnent les changements de répartiteur sont, à ce point de vue, extrêmement pénalisantes (fig. 29) : elles conduisent à un changement complet des modes d'écoulement de l'acier et induisent des modifications de distribution de la poudre de coulée continue qui peuvent persister 15 min, soit le temps de couler une brame et demie (fig. 30).

Le bouchage des busettes immergées, le déblocage des busettes de répartiteur, le contrôle en manuel du niveau d'acier en lingotière, voire le type de régulation du débit d'acier utilisé, sont d'autres conditions de coulée qui détériorent gravement l'écoulement de l'acier (fig. 31-34).



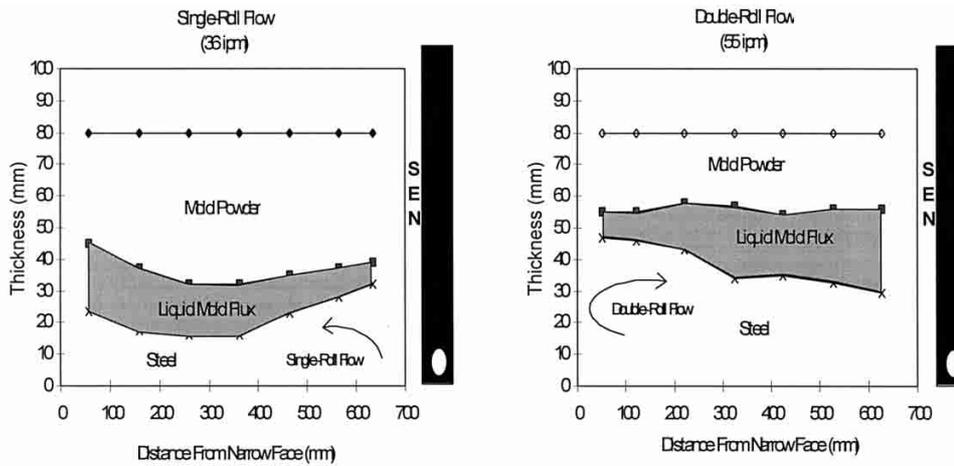
**Fig. 28 – Mesures MFC (brames de 1295 mm ; 1,270 à 1,016 m/min ; 14 l/min). Durant ce changement de poche qui a duré 4 min, les trajectoires de l'acier sont passées de « double-roll » à « single-roll », puis à nouveau à « double-roll » sans que ce changement ait pu être détecté par des variations de niveau excessives.**

Fig. 28 – MFC measurements (51-inch wide ; 50 to 40 ipm, 14 l/min). Moderate casting speed changes during ladle exchange cause steel flow pattern to make a transition from double-roll to single and double again. Note the meniscus velocity increase that may disrupt molten slag layer.



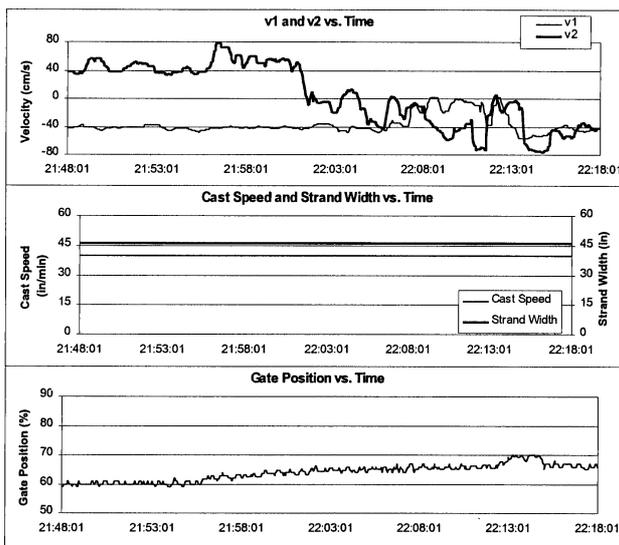
**Fig. 29 – Mesures MFC (brames de 1651 mm ; 1,270 m/min ; 12 l/min). Après un changement de répartiteur, il peut falloir jusqu'à 15 min aux trajectoires de l'acier pour se restabiliser.**

Fig. 29 – MFC measurements (65-inch wide ; 50 ipm ; 12 l/min). It may take up to 15 min for the flow pattern to stabilize again after a tundish fly.



**Fig. 30 – Mesure du profil d'épaisseur de la poudre de couverture (brames de 1854 mm ; 13 l/min). Inversion des trajectoires de l'acier durant les changements de vitesses qui accompagnent les changements de répartiteur.**

Fig. 30 – Nail board measurements (73-inch wide ; 13 l/min). After ladle exchange, as casting speed is increased from 36 to 55 ipm (0.9 to 1.4 m/min), the steel flow pattern is reversed and powder shearing occurs.

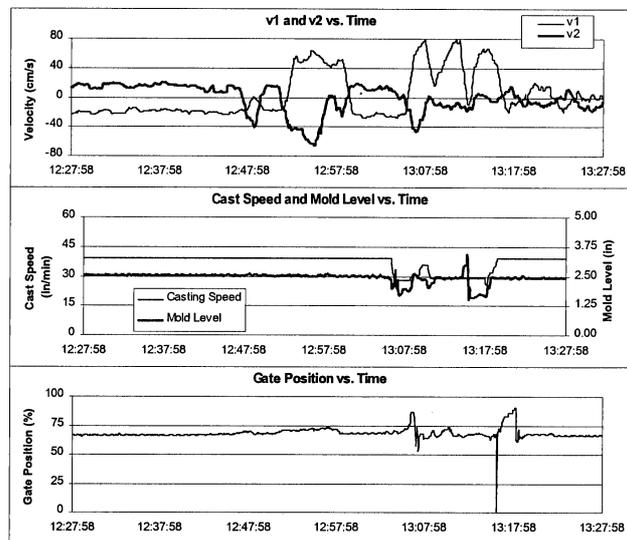


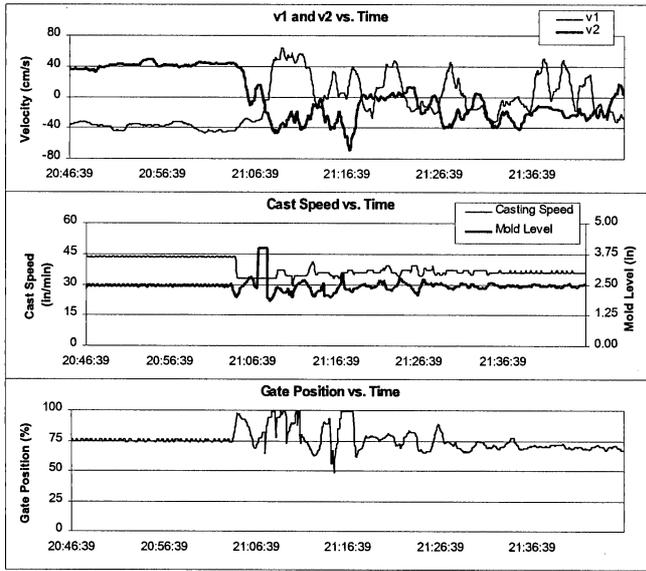
**Fig. 31 – Mesures MFC. Le bouchage des busettes déstabilise les trajectoires de l'acier.**

Fig. 31 – MFC measurements. Clogging (evident from the slide gate opening rate) makes the steel flow pattern unstable.

**Fig. 32 – Mesures MFC (brames de 1295 mm ; 1,016 m/min ; 14 l/min). Le bouchage des busettes déstabilise les trajectoires de l'acier et peut les faire passer de double-roll à single-roll et finalement entièrement chaotiques.**

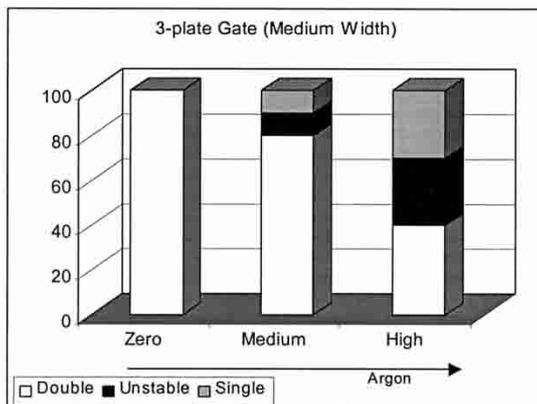
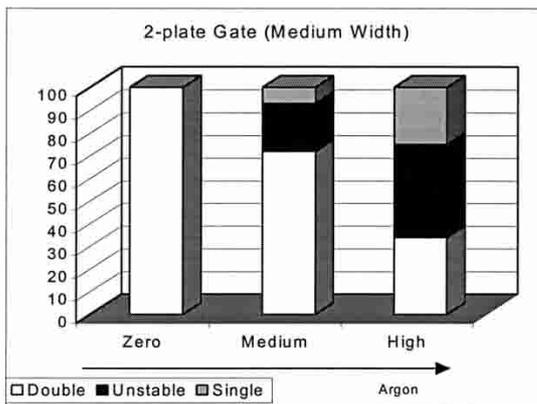
Fig. 32 – MFC measurements (51-inch wide ; 40 ipm ; 14 l/min). Clogging and rodding (as evident from the slide gate position change) create an uncontrolled steel flow pattern (transitioning from double/single-roll to chaotic in the present example).





**Fig. 33 – Mesures MFC (brames de 1270 mm ; 1,143 à 0,889 m/min ; 13 l/min). En régulation manuelle, les trajectoires de l'acier sont très perturbées.**

Fig. 33 – MFC measurements (50-inch wide, 45 to 35 ipm, 13 l/min). Manual mould level control (high level fluctuations) causes turbulent steel flow.



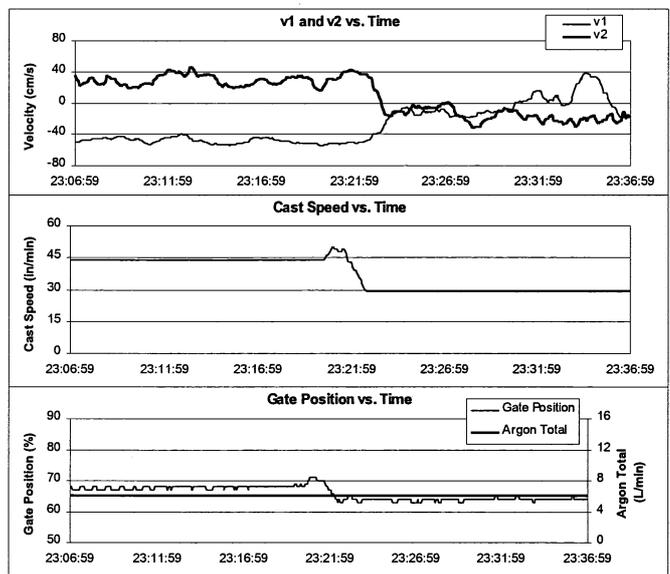
**Fig. 34 – Mesures MFC. Les trajectoires de l'acier sont 10 % plus stables avec des fermetures à trois plaques qu'avec des fermetures à deux plaques.**

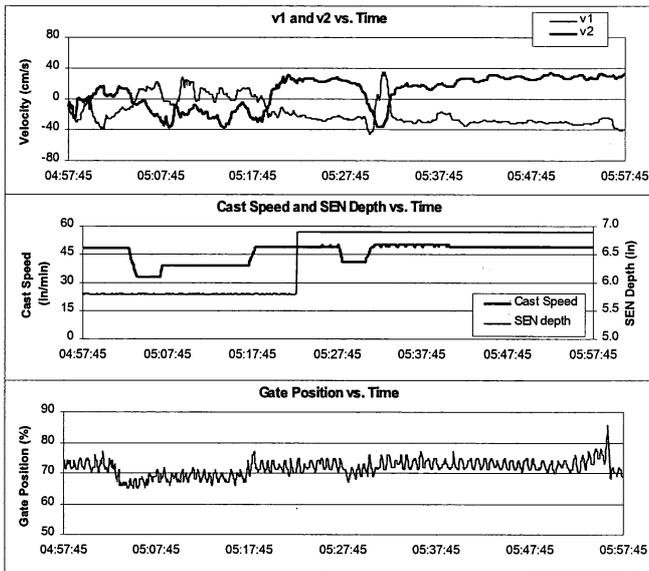
Fig. 34 – Steel flow pattern is 10 % more stable with 3-plate gates than with 2-plate gates.

Cependant, de toutes les conditions de coulée, nos observations démontrent que la cause la plus insidieuse d'instabilité de l'acier en lingotière est l'argon: même de faibles débits d'argon (6,5 l/min) peuvent déstabiliser l'écoulement de l'acier à faible vitesse d'extraction (fig. 35), la seule solution restante étant d'augmenter la profondeur d'immersion de la busette (fig. 36) au risque de réduire le transfert de chaleur vers le ménisque et de compromettre la fusion de la poudre de couverture.

**Fig. 35 – Mesures MFC (brames de 1143 mm ; 1,143 à 0,762 m/min ; 6,5 l/min). L'effet néfaste de l'argon est particulièrement important à basse vitesse.**

Fig. 35 – MFC measurements (45-inch wide, ; 45 to 30 ipm ; 6.5 l/min). When casting speed is reduced from 45 to 30 ipm, the effect of even a low argon flow (6.5 l/min) prevails. This makes the steel flow pattern evolve from double-roll to unstable/alternating double/single-roll and result in close-to-zero meniscus velocities.





**Fig. 36 – Mesures MFC (brames de 1397 mm ; 1,270 m/min ; 14 l/min). Influence favorable d'une grande profondeur d'immersion de la busette sur la stabilité des trajectoires de l'acier.**

Fig. 36 – MFC measurements (55-inch wide, 50 ipm, 14 l/min). At high argon flows, increasing SEN depth from 5.8 to 6.8 inches (148 to 173 mm) definitely makes the steel flow pattern more stable (evolving from alternating single/double-roll to stable single-roll in the present example).

Cette liste de « mauvaises » conditions opératoires n'est évidemment pas exhaustive et les figures 24 à 27 sont là pour nous rappeler que beaucoup de paramètres qu'actuellement nous ne suivons pas (ou pire, ne soupçonnons pas) sont encore à contrôler. La lingotière de coulée est encore une boîte noire, et beaucoup d'autres études seront encore nécessaires pour déterminer l'effet de paramètres tels que le taux de remplissage des répartiteurs, le taux d'augmentation/réduction des vitesses de coulée, le dessin et la porosité des busettes, le soin donné au maçonnerie des pièces réfractaires, l'âge des busettes, la pression d'argon, etc.

## ■ CONCLUSIONS

Il ressort de cette étude les points suivants :

- La similitude entre modèle à eau (mesure PIV) et lingotière industrielle (mesure MFC) n'a été confirmée qu'en l'absence d'argon.
- Lorsque de l'argon est utilisé, et du fait semble-t-il de la dimension très variable (et imprévisible) des bulles d'argon, les modèles à eau ne permettent pas de prédire avec précision les mouvements réels de l'acier liquide en lingotières industrielles.
- Les mouvements de l'acier liquide en lingotières sont très turbulents.

- La vitesse d'extraction, le débit d'argon, la largeur de la brame et la profondeur d'immersion de la busette sont autant de facteurs qui ont une influence majeure sur la vitesse de l'acier au ménisque et sur les trajectoires suivies par l'acier liquide.

- De hauts débits d'argon (en particulier à basses vitesses de coulée) ainsi que des conditions transitoires telles que des bouchages de busette, des variations de vitesse ou des changements au vol de répartiteur détériorent significativement la stabilité des trajectoires de l'acier. Ainsi, il faut près de 4 min à l'acier pour retrouver une situation d'équilibre après un changement de vitesse de coulée; près de 15 min après un changement de répartiteur.

- La qualité de l'acier fini (exfoliations et boursoufflures) est fonction du type et de la stabilité des trajectoires suivies par l'acier, deux conditions guère prévisibles à partir des paramètres de contrôle habituels de coulée mais démontrant toutes deux la nécessité de réduire, contradictoirement, les débits d'argon et le bouchage des busettes.

**Pierre H. DAUBY**, diplômé de l'Université de Louvain à Louvain/Leuven en 1962. Actuellement Director of Technology à LTV Steel. Chef du service « Aciérie/Coulée continue » au CRM à Liège jusqu'en 1982.

**Mohammad B. ASSAR**, diplômé des Universités de Tabriz (Iran) et Case Western Reserve (USA). Depuis 1995, Staff Engineer à LTV Steel, département « Coulée continue ».

**George D. LAWSON**, diplômé de l'Université McGill à Montréal en 1978. Actuellement Sr. Staff Engineer à LTV Steel, département « Coulée continue ». Caster Metallurgist à Algoma Steel, Sault Ste Marie, jusqu'en 1992.