

Étude de la formation de la peau en coulée continue sans solidification au ménisque. II. Mécanismes de formation des marques

P. Berthod*, G. Lesoult**

* Laboratoire de Chimie du Solide Minéral (UMR - CNRS 7555),
Université Henri Poincaré, Vandœuvre-lès-Nancy
(anciennement : Pont-à-Mousson S.A. - DDPP)

** Laboratoire de Science et Génie des Matériaux et de Métallurgie
(UMR - CNRS 7584), École des Mines, Nancy

Pour identifier l'origine des marques de surface en coulée continue sans solidification au ménisque, un travail expérimental a été mené avec deux maquettes de simulation utilisant l'une des alliages métalliques, l'autre des alliages transparents. Après avoir exposé dans un premier article les résultats de l'observation de divers échantillons réalisés, nous présentons ici les résultats de l'observation directe des phénomènes. L'ensemble de ces données permet de proposer un premier modèle microscopique pour la formation des marques.

■ INTRODUCTION

L'état de surface des demi-produits de coulée continue horizontale, tels que les billettes ou les ronds, pose souvent un problème à cause de la présence de marques creuses perpendiculaires à la direction de coulée et régulièrement réparties le long du demi-produit. Nous avons tenté de comprendre la formation de ces défauts en essayant de les reproduire sur deux maquettes que nous avons décrites dans un précédent article (1). Rappelons que l'une de ces maquettes permet d'observer la solidification d'alliages organiques transparents (maquette « froide ») et que l'autre permet d'étudier, sans observation directe, le comportement spécifique d'un alliage métallique particulier, la fonte eutectique (maquette « chaude »). L'observation des échantillons solides de fonte ou d'alliage organique, obtenus respectivement avec la maquette chaude et avec la maquette froide, nous a fourni des premiers résultats qualitatifs que nous avons présentés dans l'article précédent.

Manuscrit reçu le 27 juillet 2000, bon à publier le 16 mai 2001.

© La Revue de Métallurgie 2001.

Les échantillons de fonte solidifiés dans la maquette chaude, de forme cylindrique, présentent deux types principaux de marques circulaires : les marques de premier type et les marques de second type, respectivement. Elles sont intercalées et se reproduisent périodiquement le long de l'échantillon. Ces marques ont aussi été qualifiées de « marques de joint » pour les premières, de « rides principales » pour les secondes. Les marques de joint sont ainsi nommées parce qu'on pense qu'elles ont été laissées par le joint isolant séparant, dans la lingotière, la partie refroidie de la partie chauffée. Les rides principales sont appelées ainsi du fait de leur similitude avec d'autres marques circulaires, plus légères, qui n'apparaissent que lorsque le déplacement de l'échantillon dans la maquette chaude est particulièrement lent. Ces marques légères, que nous avons aussi appelées « rides », sont plus fines que la ride principale mais beaucoup plus nombreuses, et elles recouvrent la totalité de la surface de l'échantillon. Elles apparaissent dans les mêmes conditions de coulée que des nouveaux défauts ayant l'aspect de tourbillons, les « vortex ».

Les échantillons d'alliage organique solidifié possèdent eux aussi des marques de joint et des rides principales. Dans certaines conditions, il s'y ajoute systématiquement d'autres marques. Les échantillons de succinonitrile possèdent en plus un réseau de rides transversales ou un réseau de « stries » parallèles à la direction de tirage, selon que la vitesse de tirage est haute ou basse ou que le refroidissement par la lingotière est faible ou fort. Les rides sont d'autant plus fines que la vitesse de tirage est élevée ou que l'intensité de refroidissement est faible. Les stries sont parfois accompagnées de vortex sur les échantillons de succinonitrile.

Dans ce second article, après ce rappel rapide des résultats précédents, nous commençons par présenter les résultats de l'observation directe de la solidification des alliages organiques transparents avec la maquette froide, notamment ceux relatifs à la manière dont la peau se développe contre la partie refroidie de la lingotière. Par la suite, nous recensons les similitudes d'aspect observées entre échantillons d'alliage organique et échantillons de fonte ; elles nous ont donné l'idée d'utiliser les constats faits sur maquette froide pour choisir les hypothèses de départ dans le cas de la fonte. Ensuite, nous apportons des données quantitatives

Study of the formation of the skin in meniscus free continuous casting. II. Mechanisms of formation of marks

P. Berthod*, G. Lesoult**

* Laboratoire de Chimie du Solide Minéral (UMR - CNRS 7555),
Université Henri Poincaré, Vandœuvre-lès-Nancy
(anciennement : Pont-à-Mousson S.A. - DDPP)

** Laboratoire de Science et Génie des Matériaux et de Métallurgie
(UMR - CNRS 7584), École des Mines, Nancy

In vertical continuous casting, the formation of linear marks observed all around the products – “the ripples” – is known to be due to the partial solidification of the meniscus of the free surface of the liquid metal. On the contrary, in the case of horizontal continuous casting or meniscus-free continuous casting, the presence of ripples or marks on the surface of the cast products still remains mysterious. In fact, the initial solidification against the cold mould occurs far from the free surface of the liquid metal. In order to better identify the solidification mechanisms that are responsible of the ripples appearance on the surface of the horizontal continuous casting products we have built two experimental devices. With the so-called «hot» device, it is possible to obtain spheroidal graphite cast iron (SG iron) samples that have been solidified in the same manner as the products in meniscus-free continuous casting (as far as the formation of the skin is concerned). The “cold” device allows the direct observation of the solidification of organic compounds that are transparent in the liquid state and opaque in the solid state.

In a first companion paper, we presented both the “hot” and the “cold” devices, the results of the study of the marks on the surface of samples and the influence of various casting parameters on these marks. We observed that the type, number, width and depth of the marks depend on the extraction speed and the temperature of the cooling liquid. The microstructure of cast iron samples also had been observed and it appeared that there was a good correspondence between the microstructure evolution in the sub-surface and the location of the types of marks. Here, we present the results of the direct observation of the phenomena and we use these observations to understand how the skin solidifies and how the marks appear in a meniscus-free continuous casting process.

During the experiments that were carried out with the cold device, we could clearly see that the skin forms in two parts : a static skin which grows directly from the cold mould as the extracted solid is pulled up, and a dynamic skin that grows from the extremity of this last one. The second type of mark that is observed in the middle of the organic compound samples appears to be the trace of the junction of these two parts of the skin. From the analogy between this mark of junction on transparent materials and the principal ripple that exists on the outer surface of the cast iron samples, it appears that this principal ripple is a mark of junction also for these samples. Then, the two solidification modes also exist in the hot device.

Furthermore, we made a special cold mould in order to make experiments to get more precise data on the growing kinetics of the dynamic skin in the so-called hot device. With an instrumentation using thermocouples we got information on heat transfer and we showed that the movement of the dynamic skin along the cold mould deteriorates the thermal contact between them. The analysis of the microstructure also gave us data for the kinetics of thickening of the skin.

After the models of the formation of the marks for the metallic mould casting and the vertical conventional continuous casting processes, we present a first microscopic model. This model can explain the formation of the marks of both the first and second type and give possible origins for the occurrence of some unusual marks we have observed on samples during our experiments.

complémentaires sur la cinétique de solidification de la peau, obtenues par observation directe avec la maquette froide et par l'exploitation de particularités métallurgiques et géométriques des échantillons de fonte, naturelles ou provoquées. Enfin, l'ensemble de ces résultats expérimentaux nous permet de proposer des mécanismes de solidification de la peau compatibles avec l'observation des marques décrites dans le premier article.

■ OBSERVATION DIRECTE DE LA SOLIDIFICATION ET PHÉNOMÈNES MACROSCOPIQUES

L'observation directe de la solidification à l'aide de la maquette froide facilite grandement le choix des hypothèses à placer à la base d'un modèle de formation de la peau solide contre la paroi de la lingotière dans le procédé concerné.

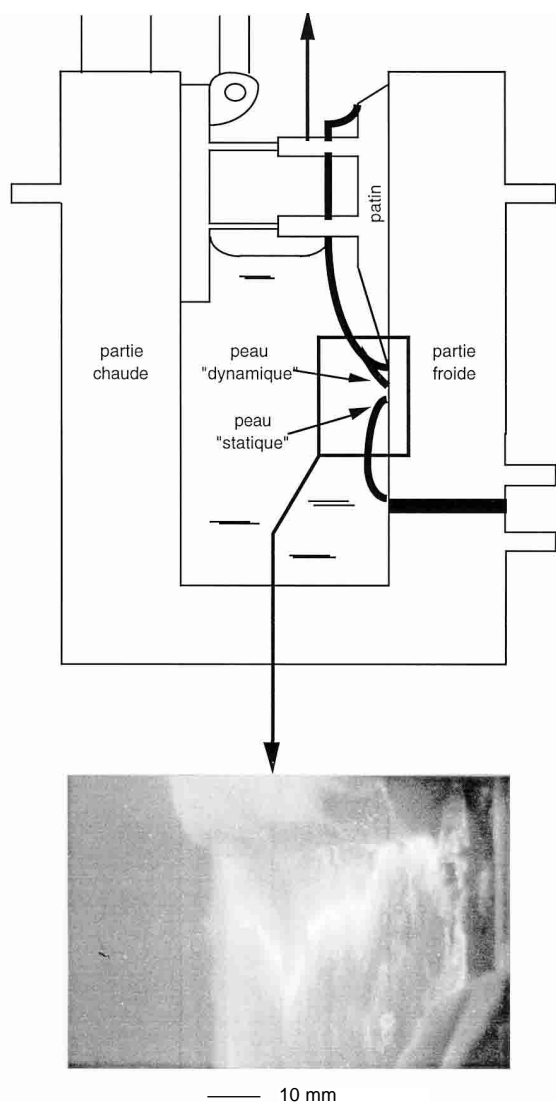


Figure 1 – Peau dynamique se solidifiant à partir du patin.

Figure 1 – Dynamic skin solidifying from the skate.

La *figure 1* rappelle que la maquette froide est constituée principalement d'une lingotière en U comportant une partie froide et une partie chaude, maintenues respectivement à -25 et à $+60^{\circ}\text{C}$. Deux plaques transparentes enserrant la lingotière et assurent l'étanchéité. Un patin métallique mû verticalement par un vérin peut se déplacer à vitesse contrôlée le long de la partie froide de la lingotière.

Initialement, le patin est immobile et recouvre complètement la partie froide. Lorsque l'on verse l'alliage liquide dans la lingotière, celui-ci se solidifie sur le patin en formant une croûte dont l'épaisseur se stabilise au bout de quelques minutes. A ce moment, le patin est tiré vers le haut, de sorte qu'il découvre progressivement la paroi. L'alliage transparent liquide se solidifie rapidement au contact direct de la surface froide ainsi découverte. Une première peau, solidaire de la lingotière, se forme sur la paroi fixe. Une à deux secondes plus tard, on assiste à l'apparition d'une seconde

peau solide, solidaire du patin mobile. Dès lors, on assiste au recouvrement de la paroi refroidie par développement simultané de deux peaux. La peau solidaire de la lingotière est qualifiée de « peau statique » ; la peau entraînée par le patin est qualifiée de « peau dynamique » (*fig. 1*).

La frontière entre les deux peaux n'est visible que pour des vitesses de tirage assez élevées, lorsque les extrémités de ces deux peaux sont suffisamment fines ou écartées l'une de l'autre pour permettre à la lumière d'atteindre la paroi métallique et de s'y refléter. La largeur de la zone séparant les deux peaux est fonction de la vitesse de tirage du patin : elle passe de $0,5$ à 2 mm environ lorsque la vitesse croît de $0,5$ à 8 mm/s. Le mouvement ascendant de la zone frontière le long de la paroi refroidie est à peu près deux fois moins rapide que celui du patin. Ceci signifie que peau statique et peau dynamique se développent toutes deux à la même vitesse parallèlement à la paroi, vitesse commune qui est égale à la moitié de la vitesse de tirage du patin. Par ailleurs, la ligne de séparation des deux peaux, qui est initialement à peu près rectiligne et horizontale, est progressivement affectée d'irrégularités en dents de scie qui s'amplifient au cours du tirage.

En résumé, lors des expériences sur maquette froide nous avons pu assister à une croissance de la peau en deux parties solidifiées l'une statiquement et l'autre dynamiquement. La seconde partie apparaît avec un léger retard puis progresse à la même vitesse que la peau statique pendant toute la suite du tirage. Les deux types de solidification se font donc globalement à une même vitesse qui est égale à la moitié de la vitesse de tirage du patin.

Cette observation in situ, vérifiée pour toutes les vitesses de tirage essayées ($0,1$ à 8 mm/s), permet de comprendre l'observation faite sur les morceaux solidifiés retirés de la maquette à l'issue de l'expérience. Nous pouvons en effet voir que la soudure finale des extrémités des deux peaux

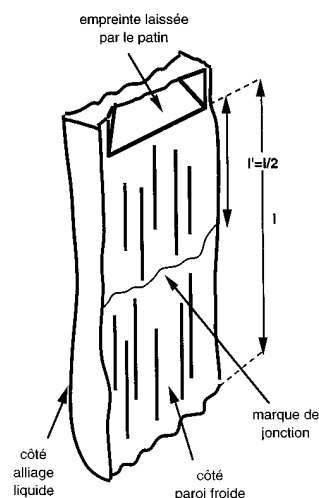


Figure 2 – Marque de jonction située à mi-longueur de la nouvelle peau solide, encore appelée marque de second type ou ride principale.

Figure 2 – Junction mark at the middle of the solidified skin, also called second type of mark or principal ripple.

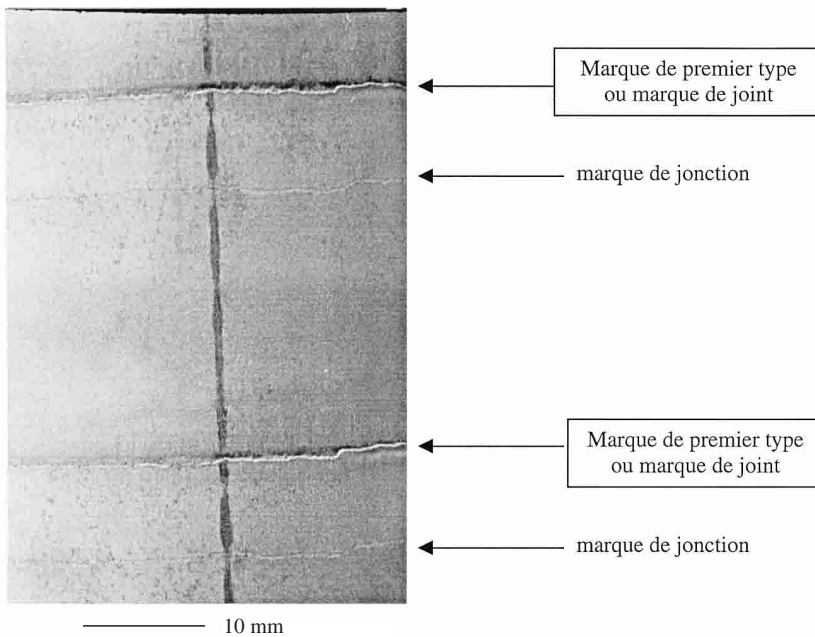


Figure 3 – Les deux types de marques présentes au dos d'un morceau de fonte solidifié dans la maquette chaude.

Figure 3 – The two different types of mark on the outer surface of a cast iron sample solidified in the hot apparatus.

s'est opérée avec l'apparition d'une marque linéique creuse particulièrement prononcée se distinguant de l'ensemble des rides dont nous avons déjà fait mention lors de la description de l'état de surface des morceaux solidifiés (1). Cette trace finale marque la jonction des deux peaux ; elle coïncide avec ce qui a été défini sur le produit final comme la marque de second type ou ride principale. C'est pour cela que, désormais, nous appellerons cette dernière : « marque de jonction ». Elle se situe à peu près à égale distance de l'empreinte de l'extrémité du patin et de l'extrémité

Vitesse moy. de croissance de la peau dynamique (mm/s)

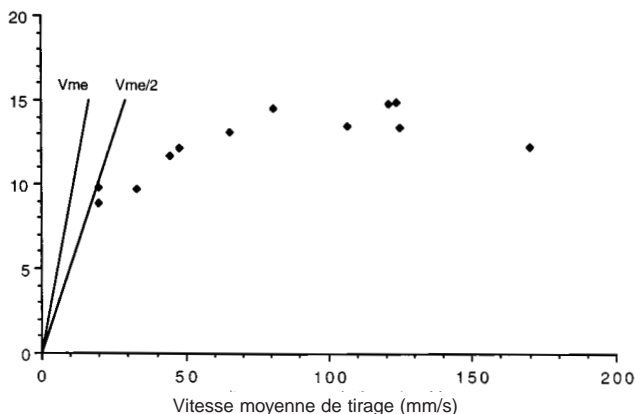


Figure 4 – Évolution de la vitesse moyenne de croissance de la peau dynamique en fonction de la vitesse de tirage.

Figure 4 – The dynamic skin's solidification speed versus the mean extraction speed.

inférieure du morceau solidifié, conséquence de l'égalité des vitesses de progression des peaux statique et dynamique (fig. 2).

En ce qui concerne les échantillons de fonte solidifiés dans la maquette chaude, on constate également la présence des « marques de joint » et des marques de second type, ou rides principales, sur la face externe (côté lingotière) (1). Ces dernières, de forme irrégulière (voire en dents de scie), se trouvent intercalées avec les marques de joint. En général, une ride principale est plus proche de la marque de joint qui la précède dans le processus de fabrication de la peau que de la marque de joint qui suit, sauf dans le cas des échantillons obtenus avec une faible vitesse de tirage. Pour ces derniers, la ride principale se situe à égale distance des deux marques de joint qui l'encadrent. Rappelons de plus que pour de tels échantillons, il existe tout un réseau de « rides », marques légères, qui recouvre la totalité de la surface externe.

La forme générale et la disposition de ces rides principales par rapport aux marques de joint, ainsi que leur analogie morphologique avec les marques trouvées au dos des échantillons d'alliage organique solidifié à la formation desquelles nous avons pu assister, nous amène assez naturellement à l'interprétation suivante :

- à l'instar de ce qui a été observé avec la maquette transparente, dans la maquette chaude il y a aussi formation de la peau en deux parties, une peau « statique » et une peau « dynamique », au cours du tirage ;
- la « marque de jonction » résulte de la soudure de la peau statique et de la peau dynamique.

Désormais, cette ride principale sera considérée comme la marque de la jonction établie entre les deux peaux à la fin du cycle de tirage, comme dans le cas des morceaux d'alliage organique solidifié (fig. 3). Aux faibles vitesses de tirage (inférieures à 20 mm/s), la position de cette « marque de jonction », à mi-chemin de deux marques de joint, indique que la vitesse de croissance de la peau dynamique est égale à la moitié de la vitesse moyenne de tirage V_{me} . Par contre, pour des vitesses de tirage de plus en plus élevées, le fait que la marque de jonction soit de plus en plus proche de la marque de joint supérieure indique que la vitesse de croissance de la peau dynamique est inférieure à la moitié de la vitesse de tirage, et que le rapport entre la première et la seconde est d'autant plus faible que le tirage est rapide. Ces résultats sont illustrés par le graphique de la figure 4 sur lequel nous avons reporté, en fonction de la vitesse de tirage, la vitesse moyenne de croissance de la peau dynamique estimée en calculant le rapport de la longueur de peau dynamique divisée par la durée du tirage.

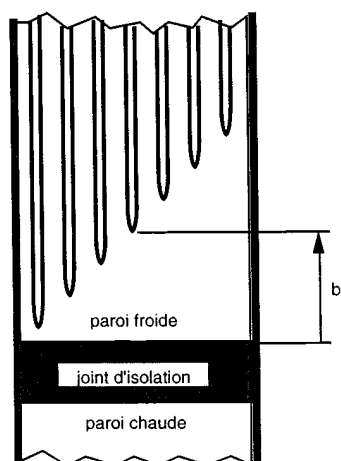


Figure 5 – Rainurage de la paroi froide pour évaluer la cinétique de croissance de la première peau.

Figure 5 – Grooves in the cold wall for the determination of the solidification rate of the skin.

■ CINÉTIQUE DE CROISSANCE ET D'ÉPAISSISSEMENT DE LA PEAU DES ÉCHANTILLONS DE FONTE AU COURS D'UN CYCLE DE TIRAGE

L'étude de la vitesse moyenne de croissance de la peau dynamique permet de conclure que les cinétiques de développement des peaux statique et dynamique sont différentes. Ce phénomène, décelé par une analyse simple en cinétique moyenne, mérite d'être précisé par une connaissance plus fine de ces deux cinétiques. A priori, avec la maquette chaude, il n'est possible d'observer l'état des deux peaux qu'au départ du tirage (longueur nulle pour chacune puisqu'elles n'existent pas encore) et qu'en fin de tirage (distances entre la marque de jonction et les marques de joint qui l'encadrent). Ce handicap peut être réduit si l'on arrive à révéler la position des fronts de croissance des deux peaux en cours de développement à différents instants dans le même cycle de tirage.

Prélèvement d'empreinte et cinétique de croissance

Pour connaître quelques positions du front de solidification, nous avons imaginé d'en prélever l'empreinte grâce à une modification géométrique de la paroi froide. Nous avons creusé dans cette dernière un

réseau de rainures suivant plusieurs génératrices équidistantes. Elles débutent à des hauteurs croissantes par rapport au joint d'isolation thermique et se terminent toutes à l'extrémité supérieure de la paroi froide (fig. 5). Les éléments essentiels de ce réseau sont les cavités qui forment l'extrémité inférieure de chaque rainure. Leur rôle est de provoquer l'apparition simultanée de deux protubérances locales sur les surfaces externes des deux peaux, dynamique et statique respectivement. Le reste de la rainure a pour fonction de permettre la poursuite du déplacement de la peau dynamique après l'apparition de la protubérance à la fin du premier cycle d'extraction, puis le dégagement de la peau statique au cycle d'extraction suivant. Les rainures doivent finalement faire apparaître des proéminences rectilignes à la surface des produits solidifiés (fig. 6a). Du fait que la peau se développe en deux parties, ces proéminences rectilignes doivent paraître traverser perpendiculairement la marque de jonction sur le produit final. Chacune des proéminences peut être caractérisée par un couple de valeurs (h , b), h désignant la distance séparant l'extrémité haute du segment proéminent de la marque de joint supérieure et b la distance entre l'extrémité basse du même segment et la marque de joint inférieure.

La mesure de ces deux distances sur une des proéminences rectilignes doit permettre d'obtenir un point de la loi de croissance de la peau dynamique. En effet, b et h sont en fait les longueurs respectives des peaux statique et dynamique à l'instant t_0 où le métal solide extrait commencera à découvrir la

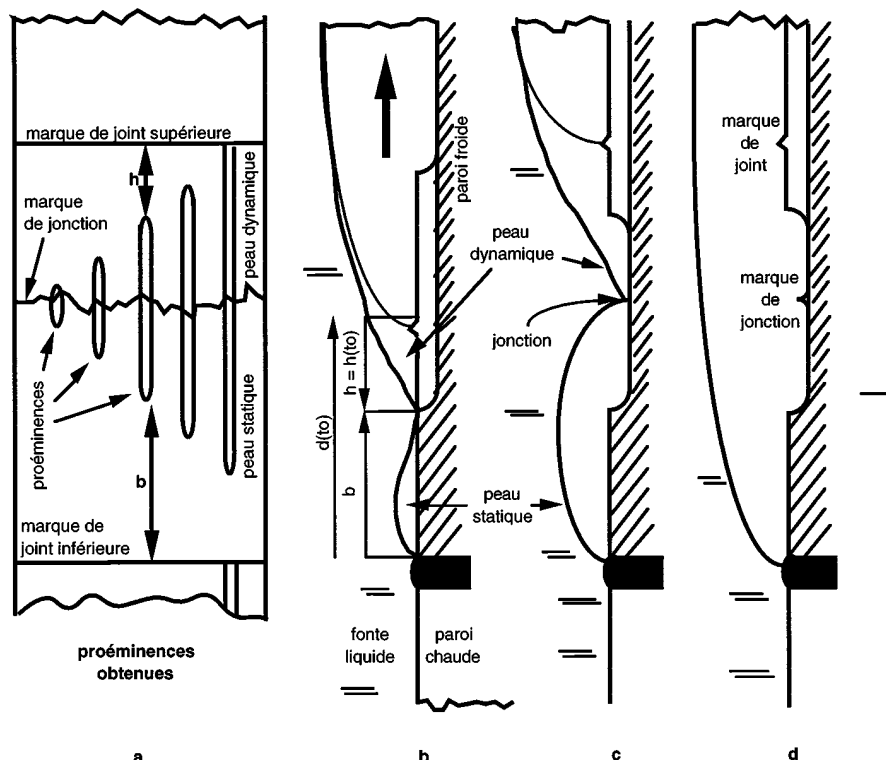


Figure 6 – Principe de l'évaluation de la cinétique réelle de la solidification dynamique par l'utilisation d'une paroi froide rainurée.

Figure 6 – Phenomena occurring in the grooves of the cold wall and method to determine the solidification rate of the dynamic skin.

rainure considérée (fig. 6b). A cet instant, il aura déjà parcouru la distance $h + b$ depuis le début du cycle d'extraction en cours. Comme la loi de tirage $d = d(t)$ est connue (d désignant la longueur de produit extraite à l'instant t), l'instant t_0 pourra être déterminé en résolvant l'équation $d(t_0) = h + b$. La figure 6c montre schématiquement l'état prévisible de la première peau à l'instant où le mouvement de tirage est interrompu pour permettre la jonction des deux composantes, statique et dynamique, et la consolidation de cette jonction. Pour terminer la description schématique des événements, la figure 6d illustre l'état supputé de la peau à l'instant précis où le mouvement d'extraction va reprendre.

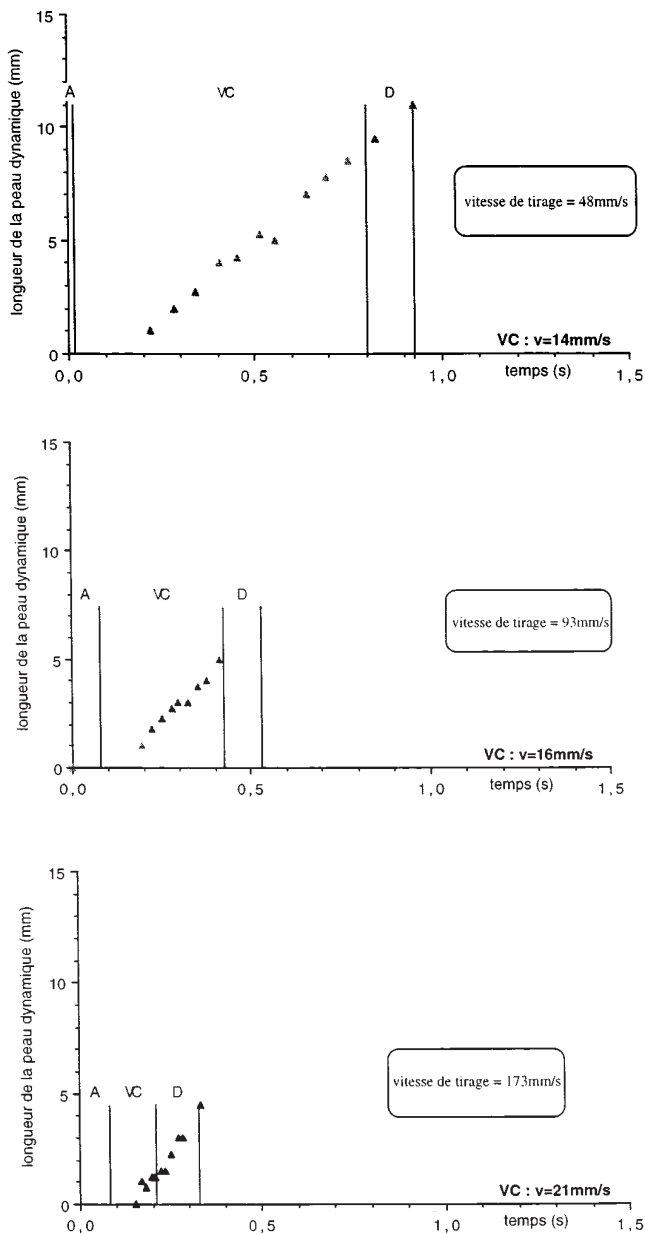


Figure 7 – Cinétique réelle de la solidification dynamique pour trois vitesses de tirage (A : accélération, VC : tirage à vitesse constante, D : décélération).

Figure 7 – Actual kinetics of the dynamic solidification for three different extraction speeds.

En exploitant toutes les proéminences rectilignes, chacune étant caractérisée par un couple (h, b) différent, on peut obtenir de fait plusieurs points de la loi de croissance de la peau dynamique. Il suffit en effet d'associer les différentes valeurs de h , mesurées aux dates t_0 correspondantes calculées, pour accéder à la fonction $t \rightarrow h$ pour la peau dynamique. Dans la mesure où il est toujours raisonnable de considérer que la peau statique suit la peau dynamique de très près, on peut aussi en déduire la cinétique de croissance de la peau statique, $t \rightarrow b$.

Les expériences réalisées sur la maquette chaude nous ont permis d'obtenir des produits solidifiés conformes à ce qui était attendu. Nous avons en effet observé à leur surface un réseau de proéminences rectilignes et parallèles semblables à celles imaginées dans la figure 6a. Toutes les proéminences traversent bien la marque de jonction, et la majorité d'entre elles ne touchent ni la marque de joint supérieure ni la marque de joint inférieure. Seules les proéminences les plus longues peuvent aller jusqu'à la marque de joint supérieure. Elles correspondent à des situations où la peau dynamique ne commence pas à croître avant que l'extrémité inférieure de la rainure soit découverte. Ce résultat prouve que la peau dynamique ne se développe pas dès les tout premiers instants du tirage.

La géométrie des proéminences rectilignes est en accord avec les prévisions faites dans l'hypothèse d'une peau se formant en deux parties statique et dynamique. Cette observation systématique confirme que le phénomène qui a été observé in situ dans la maquette froide se produit aussi dans la maquette chaude.

L'exploitation de ces proéminences rectilignes suivant la méthode précédemment exposée nous a permis d'obtenir un certain nombre de courbes $t \rightarrow h$ décrivant la cinétique instantanée de croissance de la peau dynamique, en complément des informations sur la cinétique moyenne de croissance évoquée à propos de la figure 4. La figure 7 présente une sélection de trois courbes $h(t)$ obtenues pour trois vitesses de tirage différentes. Toutes les courbes montrent à peu près la même allure. Elles sont caractérisées par un

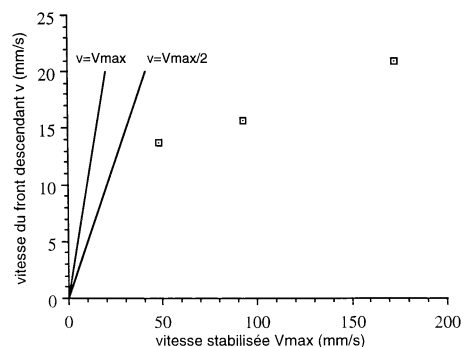


Figure 8 – Dépendance de la vitesse de la solidification dynamique envers la vitesse de tirage appliquée.

Figure 8 – The dynamic solidification speed versus the extraction speed.

temps de latence de quelques dixièmes de seconde sans solidification dynamique au début de la phase d'extraction, puis par une vitesse de croissance à peu près constante. Le temps de latence est supérieur au temps d'accélération imposé par le dispositif mécanique d'extraction du produit solide, repéré sur la *figure 7* par la lettre 'A' ; il empiète même nettement sur la phase à vitesse instantanée d'extraction constante (repérée par 'VC'). En fin de cycle, au contraire, l'étape de croissance à vitesse constante de la peau dynamique déborde légèrement sur la phase de décélération du mécanisme d'extraction (repéré par 'D').

Nous avons estimé les vitesses de croissance stationnaires en mesurant la pente des droites de régression passant par les points appartenant à la phase de déplacement uniforme, et nous les avons reportées en fonction de la vitesse de tirage dans la phase stationnaire d'extraction (*fig. 8*). Les conclusions pour la cinétique instantanée sont analogues à celles déjà énoncées pour la cinétique moyenne : la vitesse de croissance de la peau dynamique est une fonction croissante de la vitesse de tirage. À vitesse stationnaire de tirage faible ($v_{\max} < 20$ à 30 mm/s), la vitesse de croissance de la peau dynamique est voisine de la moitié de la vitesse de tirage. Pour des vitesses de tirage supérieures, la vitesse de croissance de la peau dynamique augmente beaucoup plus lentement que la vitesse de tirage.

Estimations des flux thermiques

Comme la peau statique, la peau dynamique croît sous l'effet du refroidissement par la lingotière. Du fait de son mouvement relatif par rapport à cette même lingotière, l'évacuation de la chaleur peut ne pas être la même que pour la peau statique. Pour vérifier ce point, la partie refroidie de la maquette chaude a fait l'objet d'une instrumentation permettant d'accéder à des données thermiques en cours d'essai. Des thermocouples ont été disposés verticalement tous les 5 mm à partir du joint d'isolation thermique, à une distance fixe de 2,5 mm de la surface en contact avec la fonte. En régime thermique stabilisé, au bout d'un nombre suffisant de cycles d'extraction, nous avons pu ainsi mesurer la température dans la lingotière et constater que celle-ci se situait vers $600-700^{\circ}\text{C}$ dans les 10 premiers millimètres à partir du joint pour descendre jusque vers 300°C à partir de 30 mm au-dessus du joint.

En prenant aussi en compte d'autres mesures thermiques plus globales au niveau du circuit de refroidissement, nous avons calculé la densité du flux thermique échangé entre la fonte et la lingotière moyennée sur le temps d'un cycle d'extraction à différentes hauteurs dans la lingotière. Elle passe d'environ 5 MW/m^2 sur les 10 premiers millimètres à partir du joint à la moitié de cette valeur sur le reste de la longueur du pas d'extraction (entre 20 et 50 mm). C'est au niveau des 10 premiers millimètres de la lingotière que sont échangés 20 % de la puissance thermique totale évacuée par la lingotière sur toute sa hauteur, soit 140 mm. Il est possible d'expliquer cette hétérogénéité des échanges thermiques dans la lingotière en considérant que les transferts sont plus intenses entre une peau statique solidaire de la lingotière et la lingotière qu'entre une peau dynamique en mouvement par rapport à la lingotière et cette même lingotière. La zone des 10 premiers millimètres est celle où la peau est le plus longtemps statique sur la période d'un cycle d'extraction ;

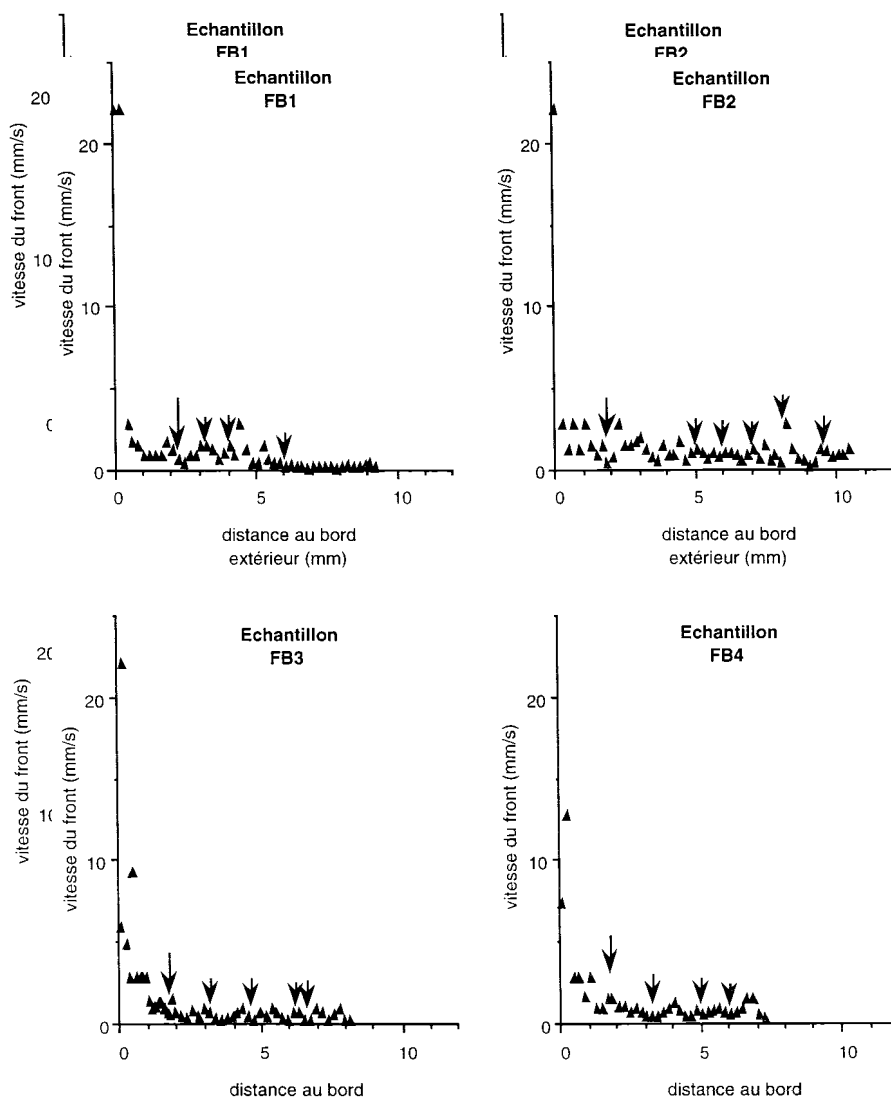


Figure 9 – Évolution transversale de la vitesse de solidification sur quatre échantillons de fonte blanche solidifiés dans la maquette chaude.

Figure 9 – Evolution of the growth rate from the outer side to the inner side of four white cast iron samples solidified in the hot apparatus.

c'est donc celle où les échanges thermiques peuvent être les plus intenses en moyenne sur le cycle. La différence constatée sur la puissance thermique moyennée sur un cycle entier « tirage + arrêt » peut donc bien être imputée à une différence encore plus grande entre les échanges thermiques instantanés lingotière ↔ peau statique et lingotière ↔ peau dynamique. Ce résultat est à rapprocher de celui obtenu par M'Hamdi et al. (2) avec une machine pilote de coulée continue verticale sous charge. Pour des vitesses d'extraction voisines de celles pratiquées dans la présente étude (40 mm/s en vitesse instantanée maximale et 1,5 m/min en vitesse moyenne), il a mesuré des valeurs de flux thermiques environ deux fois plus élevées au niveau où la peau d'acier se solidifie statiquement sur la lingotière qu'au-delà de cette zone.

Les études thermiques ont donc confirmé qu'un mouvement relatif de la peau par rapport à la lingotière entraîne une détérioration du contact thermique entre elles. Il n'est donc pas étonnant que, lorsqu'on opère des tirages de plus en plus rapides, la vitesse de croissance de la peau dynamique n'augmente pas aussi vite que celle de la peau statique qui, elle, bénéficie toujours d'un meilleur échange thermique avec la lingotière. Au total, c'est la peau statique qui est la mieux en mesure de combler l'écart entre les deux peaux pendant le tirage.

Cinétique d'épaississement de la peau

La progression de l'épaississement de la peau, pas plus que la croissance de la première peau, ne peut être observée directement dans la maquette chaude. Cependant il est possible, moyennant certaines conditions, d'accéder à la cinétique de solidification de la fonte en exploitant sa microstructure. En effet, quand la fonte se solidifie suivant le système métastable austénite-cémentite, il existe une équation reliant la vitesse de solidification locale V_{sol} à l'espacement interlamellaire d_L de l'eutectique lédéburitique. Grâce à cette relation, qui est du type $d_L = K.V_{sol}^{-n}$, et à partir des mesures de d_L faites au microscope optique sur les échantillons attaqués, il est possible de connaître en tous points la valeur de V_{sol} . Par la suite, l'intégration permet de remonter à la cinétique d'épaississement.

Nous avons donc utilisé la maquette chaude avec une fonte non inoculée et procédé à l'analyse métallographique des échantillons de fonte blanche obtenus. Après synthèse de la littérature (3-8), nous avons retenu la corrélation suivante :

$$d_L = 1,4.V_{sol}^{-1/3}$$

avec d_L exprimé en μm et V_{sol} en mm/s .

La figure 9 présente l'évolution de la vitesse de solidification calculée en appliquant la corrélation précédente, d'un bord à l'autre de chacun de plusieurs échantillons de fonte blanche. En plus des mesures d'espacements eutectiques, il est possible de procéder à l'estimation des épaisseurs des différentes couches solidifiées. Nous pouvons en effet repérer ces couches successives grâce aux différences de teintes de gris à la surface des échantillons métallographiques préparés par coupe suivant un plan axial, polissage et attaque chimique au réactif Nital 4 %. L'épaisseur de la première couche et celles des couches solidifiées au cours des cycles suivants sont reportées ainsi sur chacun des graphiques de la figure 9. La vitesse de solidification apparaît comme étant tout d'abord très élevée, puis elle s'abaisse pour se stabiliser à une vitesse environ dix fois plus faible qu'initialement. La deuxième couche semble se former au début à une vitesse deux à quatre fois plus grande que celle de fin de solidification de la première couche, puis elle continue à s'épaissir avec une vitesse de moins en moins élevée. Ce phénomène de brutale accélération de la solidification suivie d'un nouveau ralentissement est également visible pour les couches suivantes, sauf pour les dernières couches

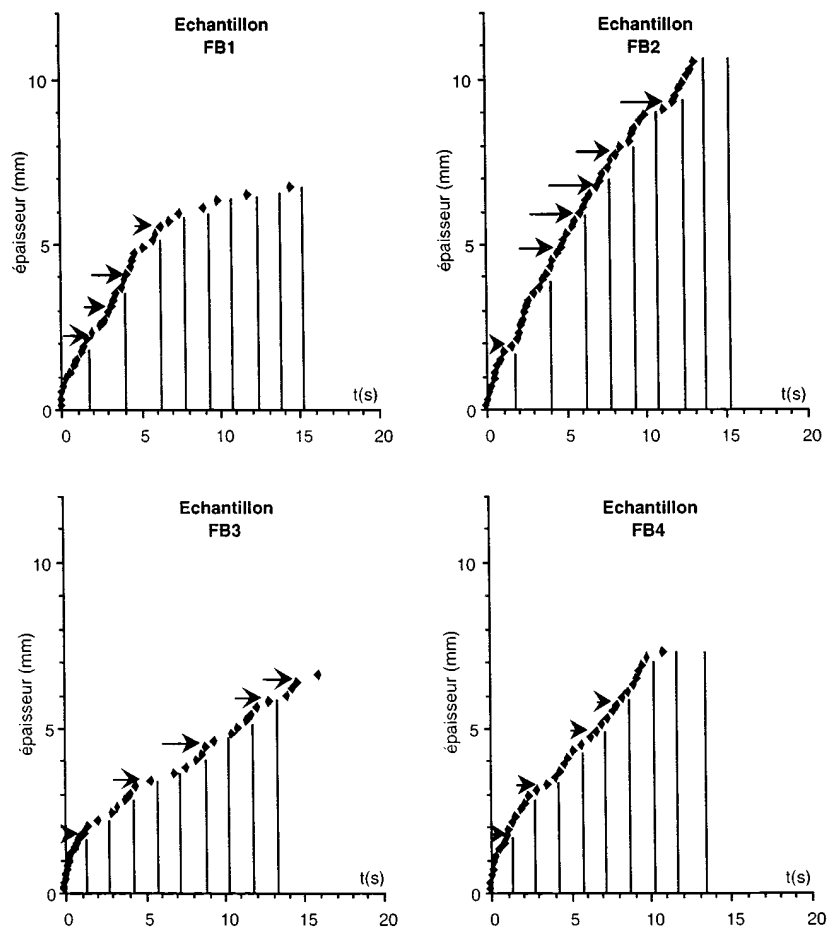


Figure 10 – Progression de l'épaississement dans quatre échantillons de fonte blanche solidifiés dans la maquette chaude.

Figure 10 – Evolution with time of the thickness of four white cast iron samples solidified in the hot apparatus.

dont la vitesse de solidification devient quasiment constante.

La *figure 10* montre la progression radiale du front de solidification, reconstituée en intégrant sur les valeurs de vitesse. On y retrouve l'épaississement initial très rapide et son ralentissement progressif par la suite.

Le choc thermique initial entre la fonte liquide et la paroi froide apparaît ainsi clairement, tout comme le ralentissement de l'évacuation de la chaleur résultant de l'augmentation de l'épaisseur solidifiée s'interposant entre fonte liquide et lingotière.

■ MÉCANISMES DE FORMATION DES RIDES ET DES MARQUES

À ce stade, il est possible de proposer un début de réponse à la question posée dans l'article précédent : comment se forment les marques superficielles et les rides dans des procédés de coulée où le début de la solidification se déroule loin du ménisque ? En particulier, comment se forment les marques de second type ?

Nous rappelons ci-après ce qui est connu aujourd'hui au sujet de la formation de la peau dans les cas classiques de coulée avec solidification au ménisque. Dans un deuxième temps, nous dégagons les points communs et les différences, du point de vue de la formation de la peau, entre les deux situations : solidification initiale près ou loin de la surface libre du métal liquide. Enfin, nous proposons un mécanisme physique pour la formation des marques de second type dans le cas que nous avons étudié, c'est-à-dire sans solidification au ménisque.

État des hypothèses actuelles au sujet de la formation des marques

Les marques en surface des lingots obtenus par coulée statique en moule fortement refroidi sont connues depuis longtemps. De nombreux travaux expérimentaux et théoriques ont été menés au sujet de leur formation (9-12). L'idée la plus couramment acceptée est que le flux de chaleur extrait par la lingotière est suffisamment intense pour qu'une partie plus ou moins étendue du ménisque, qui marque le raccord dynamique entre la surface libre du métal liquide et la paroi, se solidifie instantanément dès qu'il arrive au contact de la lingotière (*fig. 11a*). Cet événement se produit au rythme où l'élévation régulière du niveau du liquide pendant le remplissage de la lingotière provoque le débordement de la partie du ménisque déjà solidifiée au mouvement précédent (*fig. 11, b et c*). Ce mécanisme peut laisser une trace dans la zone corticale du métal, trace appelée « corne », en plus

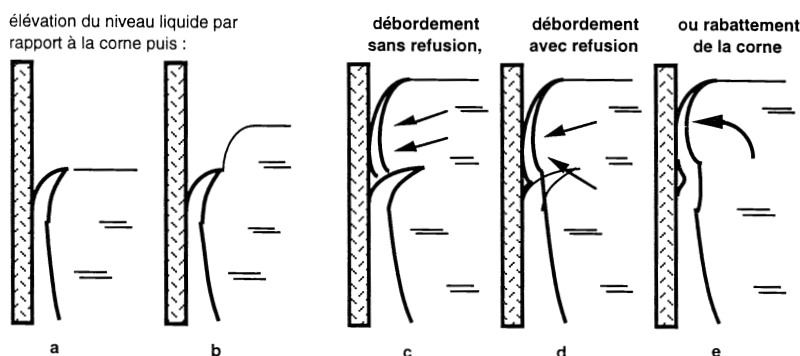


Figure 11 – Formation des rides en coulée statique.

Figure 11 – Formation of marks in the case of the static casting ingots in metallic mould.

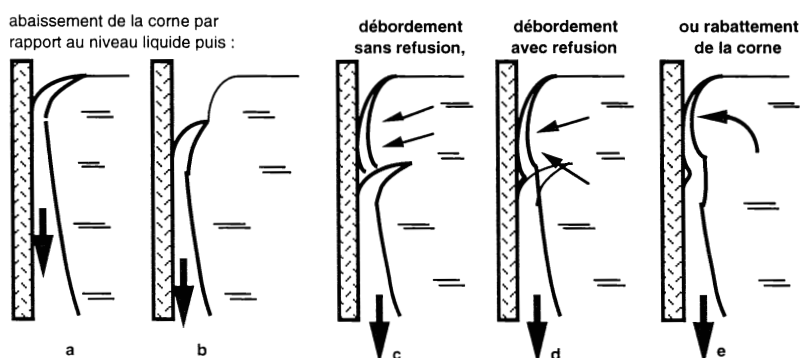


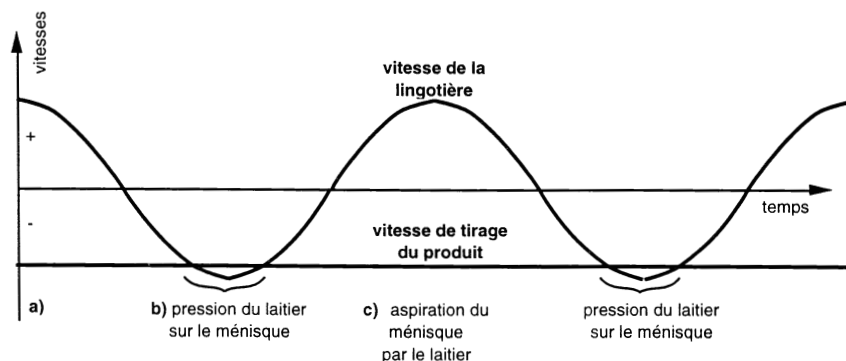
Figure 12 – Formation des rides naturelles en coulée continue sans oscillation.

Figure 12 – Formation of the natural corrugations in vertical continuous casting without oscillation.

de la marque observable en surface. On imagine que la corne peut être plus ou moins profonde : elle sera profonde si la partie du ménisque solidifiée est rigide et ne subit aucune refusion après avoir subi elle-même un débordement (*fig. 11c*) ; elle sera moins marquée si tout ou partie du ménisque solidifié peut refondre après le débordement suivant (*fig. 11d*) ; il est même possible que la partie solidifiée du ménisque soit suffisamment déformable pour qu'elle se rabatte sous l'effet de la pression hydrostatique du métal liquide (*fig. 11e*). Dans le dernier cas, il y a une marque à la surface sans corne dans le volume.

Pour la coulée continue verticale, les idées émises sur la formation des marques naturelles et des marques d'oscillation sont fortement apparentées à celle qui vient d'être présentée pour la coulée en lingot statique. Les marques naturelles, que l'on voit dans certains cas en surface des produits, sont supposées s'être formées comme précédemment, sous l'effet du flux de chaleur intense imposé par la lingotière refroidie ; la seule différence tient à la nature du mouvement relatif du niveau de la surface libre par rapport au ménisque solidifié : dans le cas de la coulée continue, ce sont la peau solidifiée et la corne formant son extrémité qui descendent par rapport à un niveau de liquide plus ou moins

I Cinétiques de l'oscillation de la lingotière et de tirage du produit



II Formation des rides d'oscillation

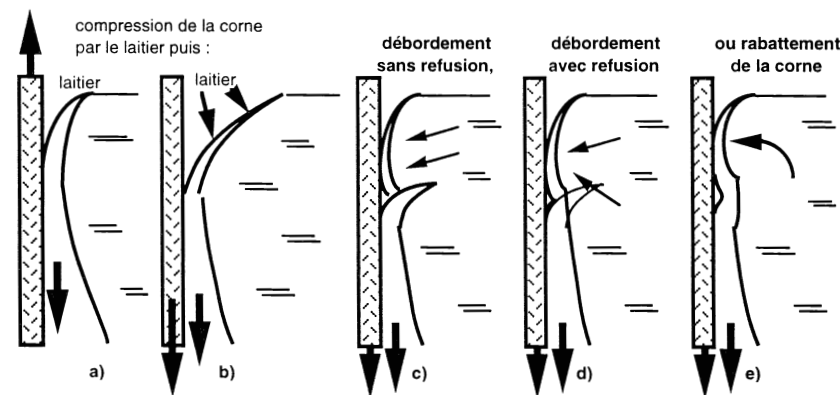


Figure 13 – Formation des rides d'oscillation en coulée continue verticale.

Figure 13 – Formation of the oscillation marks in vertical continuous casting.

constant, et non plus ce niveau qui monte par rapport à un solide fixe comme pour les lingots statiques (fig. 12). En laboratoire, des observations du comportement du ménisque d'acier liquide ont permis de confirmer ces idées (13-16). Dans le cas de la coulée continue d'acier, les marques naturelles sont souvent occultées par des marques plus profondes et plus régulières : les marques d'oscillation. Les marques d'oscillation sont associées à la déformation de l'extrémité de la peau solide par le laitier (17). Ce dernier, entraîné vers le bas par la lingotière dans la phase où celle-ci descend à une vitesse momentanément supérieure à celle de tirage du produit, exerce une pression qui courbe cette corne et déforme le ménisque vers le centre du produit (fig. 13, I et II, phase b). Au contraire, dans la phase où la lingotière remonte par rapport au produit coulé, le laitier est mis en dépression et entraîne vers la paroi de la lingotière la partie la plus mobile du ménisque, c'est-à-dire la partie liquide ; il y a débordement ou rabatement de la partie solide du ménisque (fig. 13, I et II, phase c). Comme dans le cas de la coulée des lingots statiques, le débordement est accompagné de la formation d'une corne suivie éventuellement d'une refusion partielle de la corne ou du rabatement de la partie solidifiée du ménisque (fig. 13 II, phases c, d ou e). Par rapport au cas des marques naturelles, l'oscillation impose un cadencement très régulier et amplifie les mouvements du ménisque.

Cas de la coulée continue sans solidification au ménisque

La coulée continue horizontale appartient au domaine de la coulée continue sans solidification au ménisque auquel nous nous sommes intéressés dans le présent travail. À notre connaissance, il n'existe pas encore à l'heure actuelle de modèle de la formation, à l'échelle microscopique, des marques à la surface de la peau tel que celui présenté précédemment pour la coulée statique et la coulée continue verticale classique. À l'échelle macroscopique, par contre, il est généralement admis que le recouvrement de la partie de lingotière exposée au métal liquide durant le tirage se fait par développement de deux peaux (18-20). L'une, qualifiée de peau statique, s'étend depuis la « bague de rupture » (« break ring » en anglais) dans le sens du tirage, et l'autre, qualifiée de peau dynamique, progresse en sens inverse depuis l'extrémité de la peau solide entraînée par le mouvement d'extraction (fig. 14, phase b). Durant l'arrêt, seconde phase du cycle de tirage, les deux peaux se solidarisent. Le lieu de soudure, d'épaisseur minimale, est appelé « point chaud » (« hot spot »

en anglais) tandis que la position de l'extrémité de l'ancienne peau solide est dénommée « fermeture froide » (« cold shut » en anglais) (fig. 14, phase c). Ces zones particulières correspondent en surface externe du produit final aux deux marques déjà présentées : la marque de premier type et la marque de second type.

La description précédente des phénomènes à l'échelle macroscopique donne l'illusion qu'il n'y a rien en commun entre les deux classes de procédés, selon que la solidification initiale est déclenchée près ou loin de la surface libre du liquide. Les paragraphes qui suivent précisent les différences et identifient les analogies entre les mécanismes de formation des marques superficielles de la peau dans les deux types de situation.

Mécanisme proposé pour la formation des marques de premier type

L'inventaire des étapes de la formation des marques de premier type conduit à corriger la première impression selon laquelle il n'y aurait rien de commun entre ces marques et les marques d'oscillation en coulée continue verticale classique. La figure 15 illustre les événements qui se déroulent quand la phase d'extraction commence, après la phase d'arrêt nécessaire à la consolidation de la peau (fig. 15, image a). Le métal

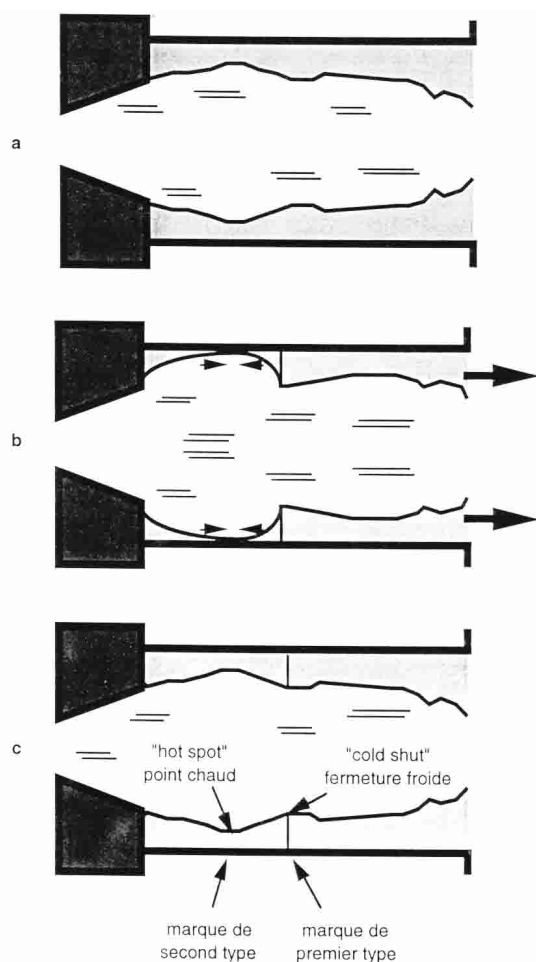


Figure 14 – Formation de la peau en coulée continue horizontale.
Figure 14 – The formation of the skin in horizontal continuous casting.

liquide s'engouffre dans l'espace grandissant entre la bague de rupture et la peau dynamique ; à cet endroit, il présente une surface avec un ménisque convexe, du fait qu'il progresse entre deux parois solides et qu'il est visqueux (fig. 15, image b). À l'instant précis où le liquide infiltré entre en contact avec la lingotière refroidie, le ménisque se fige avec sa forme dynamique convexe, semblable en cela à la forme du ménisque au niveau de la surface libre dans le cas de la coulée des lingots statiques ou de la coulée continue verticale classique (fig. 15, image c). Il apparaît ainsi sur la surface externe en formation deux reliefs, l'un contre la bague de rupture, l'autre contre la peau déjà solide, reliefs qui font partie des marques de premier type décrites dans le premier article. Il est donc logique de rapprocher les marques de premier type, observées sur les produits coulés dans des procédés où la solidification initiale est éloignée de la surface libre du métal liquide, des marques naturelles ou des marques d'oscillation bien connues dans les procédés de coulée où la solidification commence au niveau de la surface libre et de son ménisque.

Ces phénomènes se développant contre la bague d'arrêt, la forme des marques ainsi créées reproduit la géométrie régulière de l'arête de cette partie de la machine de coulée

du côté de la lingotière : les marques de premier type sont rectilignes et régulières. De plus, la distance entre de telles marques est égale exactement au rapport de la vitesse moyenne de coulée à la fréquence d'oscillation ou de tirage, selon la technique choisie.

Mécanisme proposé pour la formation des marques de second type

Pour comprendre la formation des marques de second type, nous proposons de compléter la description qualitative entreprise à propos des marques de premier type et illustrée par la figure 15. Du fait de la poursuite du mouvement de la partie dynamique de la peau, la largeur de la zone dans laquelle le métal liquide entre en contact direct avec la paroi refroidissante de la lingotière augmente (fig. 16, image a). Dans le même temps, la solidification commence et progresse partout où le liquide est fortement refroidi. Dans la zone comprise entre la bague d'arrêt et la peau dynamique déjà formée, la solidification commence précisément contre la bague d'arrêt et contre la peau dynamique, simultanément (fig. 16, image b). Entre les deux peaux en cours de formation, on imagine que le liquide reste au contact de la lingotière, jusqu'à ce que la partie statique de la peau vienne recouvrir la paroi (fig. 16, image c). À cet endroit, aucun ménisque ne préexiste avant la solidification ; rien ne permet de prévoir la formation d'une corne solide, comme dans le cas de la coulée classique. Ainsi, les phénomènes qui se déroulent dans la région comprise entre la peau dynamique et la peau statique, dans le cas des coulées sans solidifica-

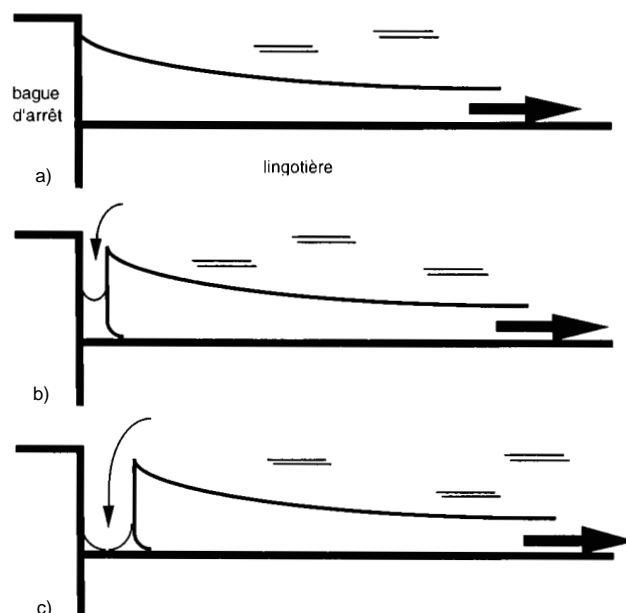


Figure 15 – Mécanisme proposé de formation des marques de premier type : progression rapide du liquide dans l'interstice créé par le mouvement d'extraction du produit.

Figure 15 – Proposed mechanism of the formation of the mark of the first type : liquid movement in the growing groove.

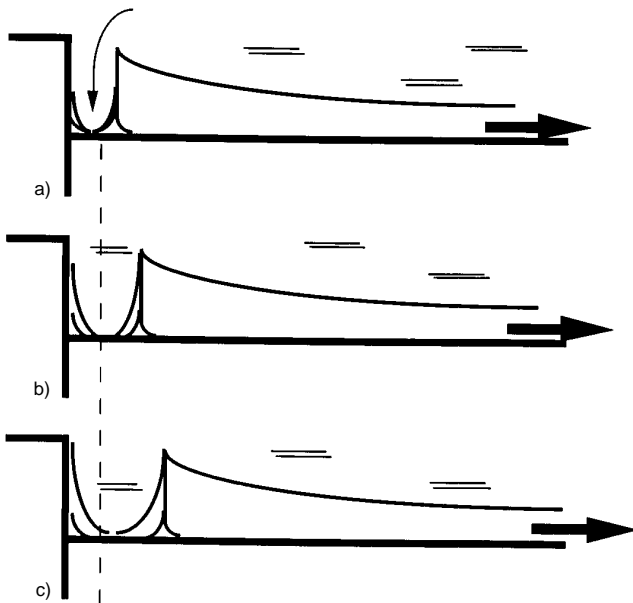


Figure 16 – Mécanisme proposé de formation des marques de second type : croissance convergente des deux peaux statique et dynamique.

Figure 16 – Proposed mechanism of the formation of the mark of the second type : growth of both static and dynamic skins.

tion au ménisque, et qui conduisent à la formation des marques de second type, n'ont pas d'équivalent dans les procédés de coulée classiques. Ce sont eux qui font l'objet du modèle qualitatif que nous proposons dans ce qui suit.

Tout modèle dans ce domaine doit rendre compte des quelques phénomènes originaux relevés dans le premier article. Un premier fait important est l'existence de rides en surface de certains échantillons de fonte et d'alliage organique. Ces rides sont notamment présentes en surface de la peau statique et elles sont d'autant plus profondes et espacées les unes des autres que la vitesse de tirage est plus faible ou que le refroidissement est plus intense. Un second fait important est que, au niveau de la ride principale, l'extrémité de la peau statique et celle de la peau dynamique sont décollées de la lingotière et forment deux cornes (fig. 17).

D'après la description des phénomènes se déroulant pendant que la peau dynamique est écartée de la bague d'arrêt (fig. 16), on imagine que la courbure des cornes au niveau de la ride principale apparaît après leur solidification, et non avant comme dans le cas des marques de premier type. Nous proposons de comprendre cette courbure en termes de déformations thermomécaniques de la peau en cours de solidification. Considérons en effet l'état thermique de la peau en formation à deux instants très proches. Prenons en compte le fait que les

transferts thermiques sont meilleurs aux tout premiers instants et qu'ils se dégradent rapidement en un point donné à mesure que la peau s'épaissit. La figure 18 représente schématiquement la forme initiale de la peau statique en cours de croissance, le profil de température dans l'épaisseur avant et après que les transferts de chaleur entre le métal et la lingotière se soient dégradés, enfin l'état de contrainte mécanique dans la peau (fig. 18, a et b). L'augmentation soudaine de la résistance thermique métal/lingotière entraîne une remontée de température de la surface externe de la peau. La couche externe, qui subit le réchauffement, tend à se dilater et passe en compression alors que la couche subcorticale passe en tension ; le rééquilibrage des tensions entraîne une déformation de la peau qui conduit à la forme de corne observée au niveau de la ride principale (fig. 18 c). Ce qui vient d'être dit vaut, à des degrés divers, pour l'extrémité de chacune des peaux en regard pendant les phases de tirage : la peau statique et la peau dynamique. Le résultat final est une marque composée de deux cornes approximativement symétriques par rapport à la normale à la surface externe au niveau de cette marque.

L'hypothèse des déformations thermomécaniques est à rapprocher de travaux théoriques menés à l'U.S. Steel Research Laboratory à la fin des années 1970 et cités par Wray à propos de ses observations sur la géométrie des surfaces (21).

Mécanisme proposé pour la formation des rides

La tendance de l'extrémité de la peau en cours de croissance à se recourber sous l'effet de contraintes thermomécaniques se manifeste pendant toute la période de tirage au cours d'un cycle d'extraction. C'est ainsi qu'on peut expliquer non seulement la formation de la ride principale mais aussi, dans certaines conditions de tirage lent, la présence de rides sur toute la surface comme nous le décrivons dans ce qui suit.

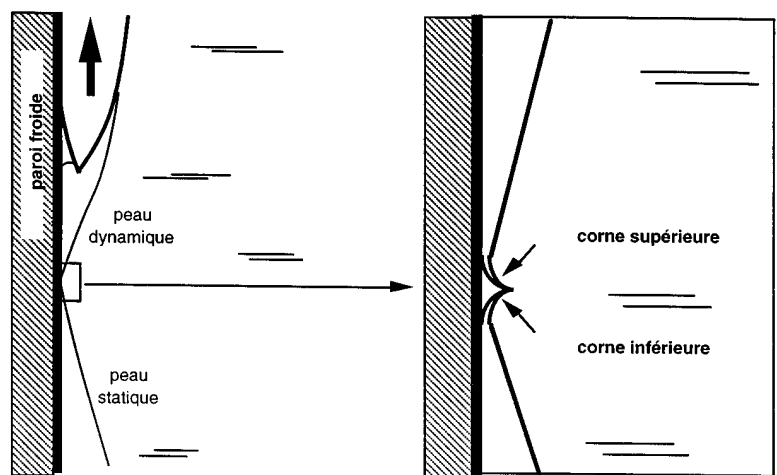


Figure 17 – Détail de la forme des extrémités des peaux statique et dynamique.

Figure 17 – Detailed shape of the extremities of the static and dynamic skins.

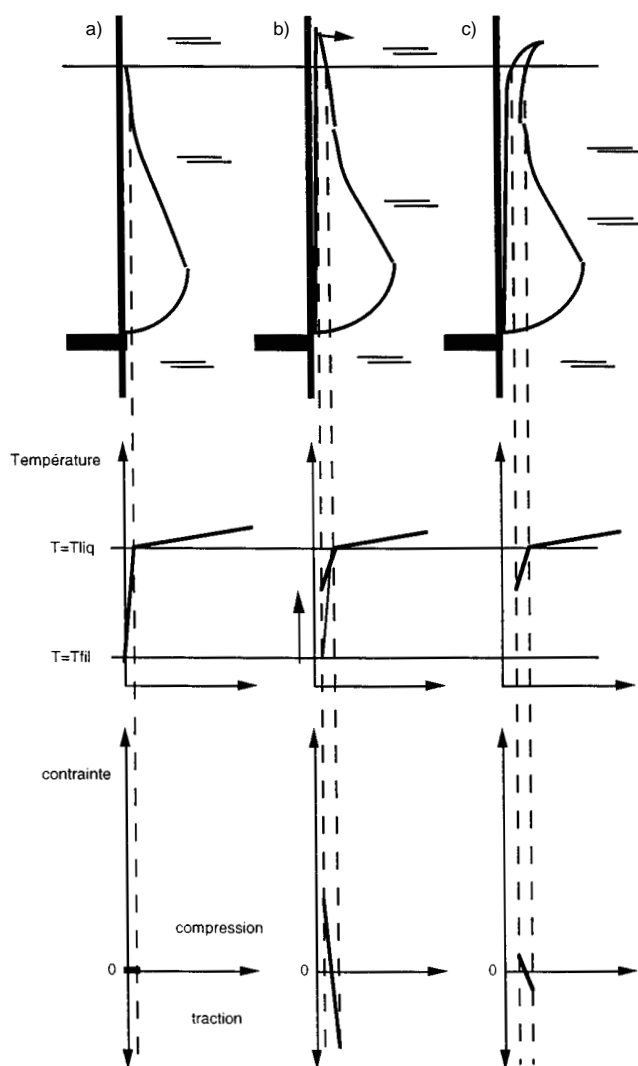


Figure 18 – Mécanisme proposé pour expliquer la forme courbe de l'extrémité de la peau statique au niveau de la marque de second type.

Figure 18 – Proposed mechanism to explain the curved shape of the end of the static skin near the mark of the second type.

Les deux cornes qui se font face tout au long du tirage dans la description proposée ici présentent plusieurs similarités et une différence essentielle avec les cornes observées en coulée continue classique.

D'après ce qui vient d'être présenté, c'est l'origine des cornes qui est fondamentalement différente : la déformation thermomécanique des extrémités en cours de croissance et d'épaississement dans le cas de la solidification loin du ménisque ; le figement d'un ménisque liquide préexistant dans le cas de la coulée classique.

Les similitudes portent sur les formes et les comportements. Le mouvement de la peau dynamique (tirée durant l'extraction) par rapport à la peau statique (fixée sur la lingotière) les expose l'une comme l'autre à tout moment à une sollicitation accrue de la part du métal liquide. Il peut alors se pro-

duire plusieurs phénomènes différents. Premièrement, le métal liquide peut contraindre les deux cornes à se rabattre périodiquement contre la filière, en faisant plier les fines pointes des cornes jusqu'à ce qu'elles touchent la lingotière, avec pour conséquence la solidification rapide de nouvelles cornes (fig. 19a). Deuxièmement, s'il n'y a pas rabattement ou si ce dernier ne peut pas se faire assez rapidement, par exemple à cause d'une trop grande résistance des cornes, l'espace entre cornes devient tel que le liquide parvient à s'infiltrer entre les deux cornes et arrive contre la filière. Il s'y solidifie alors et il apparaît deux nouvelles cornes rattachées l'une à la peau statique et l'autre à la peau dynamique. Suivant le cas, les deux anciennes cornes refondent ou non sous l'effet du réchauffement consécutif au débordement (fig. 19b) ou non (fig. 19c).

Le développement des peaux statique et dynamique se fait alors par une juxtaposition répétée de cornes inférieures pour la première et de cornes supérieures pour la seconde, avec comme conséquence pour la surface des échantillons l'apparition de marques périodiques de type rides. Ces rides sont d'autant plus marquées et espacées que les cornes inférieures et supérieures successives sont longues et épaisses au moment de leur rabattement ou de la pénétration du métal liquide entre les deux, et donc que la vitesse de tirage est faible ou que l'intensité de refroidissement est forte.

Pendant les expériences avec plus forte vitesse de tirage, les deux cornes sont à la fois plus fines et plus courtes et donc résistent moins à la poussée du métal liquide, et donc au rabattement auquel ce dernier les contraint. C'est alors essentiellement un rabattement que l'on obtient, ce dernier pouvant même devenir quasiment continu du fait d'une absence de résistance des cornes à la déformation. Les cornes se déroulent alors continûment le long de la lingotière, sans rabattement discontinu ni débordement, et donc sans apparition de rides. La progression de leur solidification, tant en allongement depuis leur pointe qu'en épaississement, se fait également de façon continue avec une cinétique qui, en tous points, contrebalance exactement la déformation, d'où une stationnarité des profils globaux des deux cornes. Aucune ride n'apparaît donc dans un tel cas, à l'exception de la ride principale ou marque de jonction, qui est formée par les deux cornes figées dans leur position finale au moment de l'arrêt du tirage, comme l'évoque le profil habituel de cette marque, illustré par une photographie dans le précédent article (1).

La formation et la déformation des cornes dépendent des conditions locales de refroidissement, plus ou moins différentes de génératrice en génératrice le long de la paroi froide, d'où une forme en dents de scie du front de solidification dynamique et finalement de la marque de jonction.

■ DISCUSSION-CONCLUSION

Après le modèle macroscopique de formation de la peau en deux parties, validé par l'observation directe sur maquette froide, nous avons proposé un modèle microscopique de formation, de croissance et de déformation des extrémités

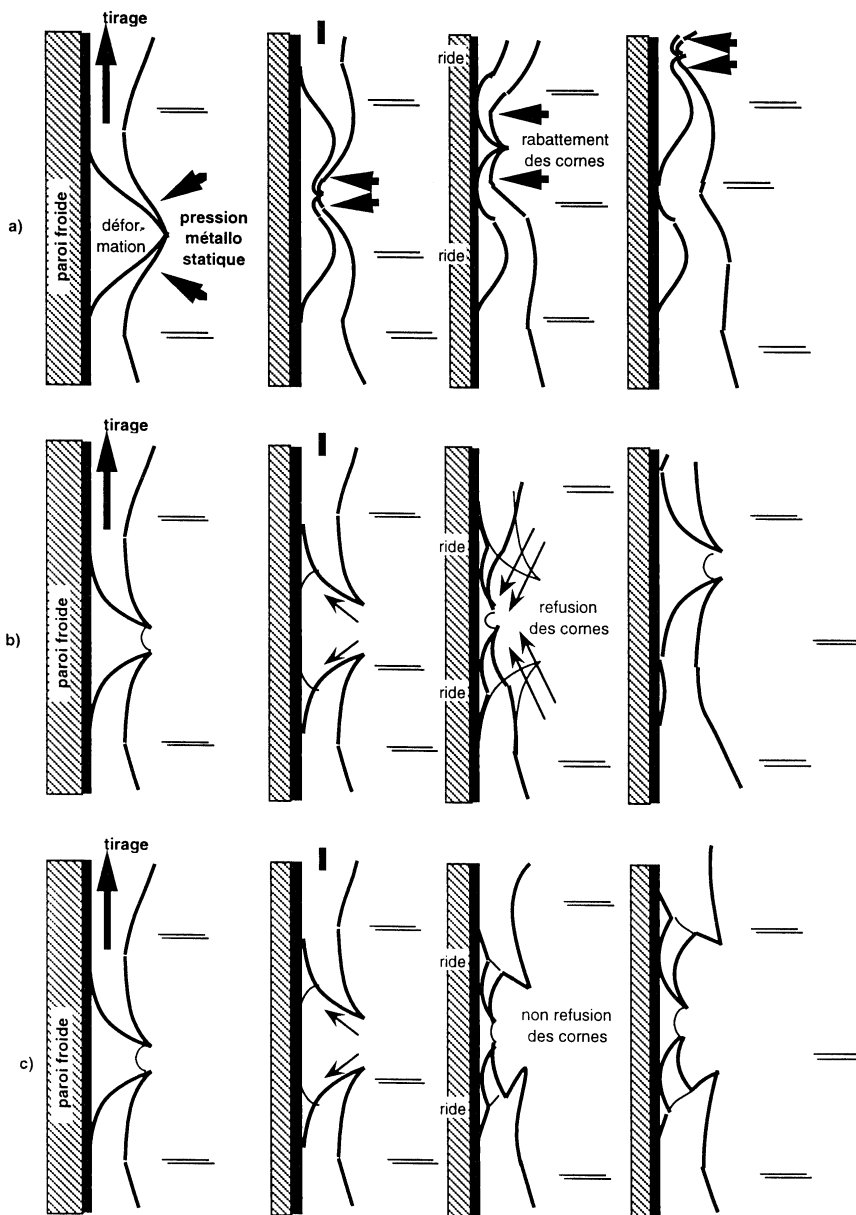


Figure 19 – Mécanismes de formation des rides pour les basses vitesses de tirage.

Figure 19 – Mechanisms of formation of corrugations when the extraction speed is low.

de chacune des parties de la peau, à savoir la partie statique et la partie dynamique.

Suivant ce modèle, les marques de premier type sont le résultat des mêmes phénomènes que ceux connus pour produire les marques d'oscillation dans le cas de coulée avec solidification partielle du ménisque : formation d'un ménisque liquide dynamique suivie du figement de ce ménisque contre la paroi refroidie de la lingotière.

Les marques de deuxième type, ou rides principales, au contraire, sont comprises comme le résultat d'une déformation thermomécanique de la peau en cours de solidification, déformation provoquée elle-même par une augmentation

brutale de la résistance thermique entre le métal et la lingotière au niveau des extrémités de la peau en formation, à la fin de chaque phase de tirage. Pendant la phase de tirage proprement dite, les mêmes phénomènes de déformation thermomécanique peuvent donner naissance à des rides.

Ce modèle permet d'expliquer pourquoi nous avons retrouvé, à la fois sur le côté extérieur de la peau statique et sur celui de la peau dynamique, des rides semblables aux rides naturelles de la coulée statique en moule métallique et de la coulée continue verticale classique. Leur forme, leur comportement vis-à-vis d'un changement de la vitesse de tirage et de l'intensité de refroidissement, ainsi que d'autres phénomènes cinétiques de développement des deux parties de la peau se trouvent également expliqués. Il en est de même pour l'orientation de la microstructure de la peau puisque celle-ci pourrait résulter, suivant ce modèle, soit de la déviation au cours du rabattement des cristaux apparus en pointe des cornes, soit du gradient de température au sein du liquide touchant la lingotière après débordement.

Remerciements

Les résultats présentés ici ont été obtenus au cours des travaux de thèse de Monsieur Patrice Berthod réalisés dans le cadre de la convention CIFRE n° 150/89 intitulée « Étude des mécanismes de solidification de pièces minces en fonte à graphite sphéroïdal obtenues par un processus de solidification pas à pas ». Les auteurs remercient la Société Pont-à-Mousson pour le financement de l'étude et l'autorisation de publication.

bibliographie

- (1) BERTHOD (P.), LESOULT (G.) – Étude de la formation de la première peau en coulée continue horizontale. I. Caractéristiques de surface des produits de coulée continue. **La Revue de Métallurgie-CIT/SGM**, 97, n° 12 (2000), p. 1441-1453.
- (2) M'HAMDI (M.), LESOULT (G.), PERRIN (E.), JOLIVET (J.M.) – Modelling of solidification in a meniscus free continuous casting. **ISIJ International**, 36 (1996), Supplement, p. S197-S200.

- (3) DESCHANVRES (A.), DUFOURNIER (D.) – Observation de la structure eutectique austénite-Fe₃C dans les fontes eutectiques et hypoeutectiques au cours de solidifications dirigées. **Mém. Sci. Rev. Mét.**, 67 (4) (1970), p. 277-284.
- (4) MAGNIN (P.), KURZ (W.) – Competitive growth of stable and metastable Fe-C-X eutectics. **Metall. Trans. A**, 19A (8) (1988), p. 1955-1971.
- (5) HILLERT (M.), SUBBA RAO (V.V.) – Grey and white solidification of cast iron. The solidification of metals, Publ. ISI 110, p. 204-211.
- (6) BRIGHAM (R.) – Controlled solidification of eutectic cast iron. Thèse, Mc Master University, Canada (1966).
- (7) WILKINSON (M.P.), HELLAWEEL (A.) – Directional freezing experiments with iron-carbon eutectic alloy. **BCIRA J.**, 11 (4) (1963), p. 439.
- (8) BRIGHAM (R.J.), PURDY (G.R.), KIRKALDY (J.S.) – Unidirectional solidification of Fe-C, Ni-C and Fe-C eutectics. In "Crystal growth", Ed. H.S. Peiser, Pergamon, Oxford (1967), p. 161-169.
- (9) STEMPLE (D.K.), ZULUETA (E.N.), FLEMINGS (M.C.) – Effects of Wave Motion on Chill Cast Surfaces. **Metall. Trans. B**, 13B (1982), p. 503-509.
- (10) ACKERMANN (P.) – Processus de formation des marques de surface typique de la coulée en lingotière fortement refroidie. Thèse n° 503, E.P.F.L. (1983).
- (11) ACKERMANN (P.), HEINEMANN (W.), KURZ (W.) – Surface quality and meniscus solidification in pure chill cast metals. **Arch. Eisenhüttenw.**, 55 (1984), p. 18.
- (12) LAKI (R.S.), BEECH (J.), DAVIES (G.J.) – Surface structures of chill and continuously cast stainless steels. **Ironmaking and Steelmaking**, 12 (5) (1985), p. 233-241.
- (13) TOMONO (H.) – Elements of oscillation mark formation and their effect on transverse fine cracks in continuous casting of steel. Thèse No. 330, E.P.F.L., Lausanne (1979).
- (14) TOMONO (H.), KURZ (W.), HEINEMANN (W.) – The liquid steel meniscus in moulds and its relevance to the surface quality of castings. **Metall. Trans.**, 12B (1981), p. 965-971.
- (15) TOMONO (H.), ACKERMANN (P.), KURZ (W.), HEINEMANN (W.) – Elements of surface mark formation in continuous casting of steel. Solidification technology in the foundry and casthouse, The Metals Society, London (1983), p. 524-531.
- (16) MATSUSHITA (A.), ISOGAMI (K.), TEMMA (M.), NINOMIYA (T.), TSUTSUMI (K.) – Direct observation of molten steel meniscus in CC mould during casting. **Trans. ISIJ**, 28 (1988), p. 531-534.
- (17) TAKEUCHI (E.), BRIMACOMBE (J.K.) – The formation of oscillation marks in the continuous casting of steel slabs. **Metall. Trans. B**, 15B (3) (1984), p. 493-509.
- (18) NAKAI (K.) et al – Effects of factors on the stability of casting in horizontal continuous casting. **Trans. ISIJ**, 24 (11) (1984), p. 983-991.
- (19) SCHWERDTFEGGER (K.) – Neue Stranggiessverfahren für Stahl : Stand des Horizontal-stranggiessens. **Stahl und Eisen**, 106 (1) (1986), p. 25-32.
- (20) HENTRICH (R.) et al – The horizontal casting of high-alloy steels using the Krupp oscillating mould process. **Iron & Steel M.**, 13 (4) (1986), p. 34-41.
- (21) WRAY (P.J.) – Geometric features of chill-cast surfaces. **Metall. Trans. B**, 12B (1981), p. 167-176.
- (22) THOMAS (B.G.), PARKMAN 5J.T.) – Simulation of thermal distortion of a steel droplet solidifying on a copper chill. Solidification 1998, edited by S.P. Marsh et al, The Mineral & Materials Society (1998), p. 509-520.