

Les grandes tendances dans la métallurgie des aciers

François Mudry

Summary

General trends in steels metallurgy

Starting from a rough analysis of the steel market, some important features of the products to be developed in the future are proposed. As well, a rough survey of some new ideas available at the laboratory scale are discussed. From a comparison of both sets of data, we risk a prediction of the coming evolutions in the field of steels metallurgy. This includes particularly new metallurgy for high strength good formability steels, new coated products with associated new coating technologies, new rapid casting technologies.

Mots-clés

Acier haute limite, formabilité, revêtements, coulée rapide.

Key-words

Steel, high strength, formability, rapid casting.

Parler des grandes tendances dans la métallurgie des aciers suppose d'avoir, à la fois, une vue assez précise de l'évolution du marché ainsi que des développements de la science métallurgique. Assez classiquement, on parle de « market pull » d'une part et de « technology push » de l'autre. Certains parlent aussi de « needs » pour désigner l'expression des besoins du marché et de « seeds » pour les propositions techniques en provenance des laboratoires.

Après avoir indiqué très rapidement les grandes tendances du marché, nous nous intéresserons aux idées de nouvelles métallurgies, au sens large, en provenance des laboratoires. Nous essayerons ensuite d'effectuer le croisement entre les deux approches avant de tenter de dessiner les « grandes tendances » telles que peut les sentir un responsable de laboratoire sidérurgique...

Ces considérations seront à la fois partielles et partiales.

Partielles parce qu'il est impossible de rendre compte des évolutions des marchés dans toutes leurs facettes géographiques et sectorielles, ni des études métallurgiques de l'ensemble des laboratoires mondiaux, même en se limitant aux aciers et à leurs revêtements.

Partiales parce que la vision donnée reflète forcément mon expérience personnelle et les centres d'intérêt du groupe industriel Usinor auquel j'appartiens.

Les tendances du marché : approche « market pull » ou « needs »

La consommation mondiale des aciers représente environ 800 millions de tonnes dans le monde et 130 millions de tonnes en Europe.

Les données historiques montrent que la hausse régulière de la consommation s'est cassée autour de 1973. Depuis, une croissance très faible et très accidentée se poursuit : la consommation, et surtout les prix, subissent des cycles qui semblent de plus en plus amples et de plus en plus rapides.

La répartition géographique se modifie rapidement, avec une stagnation de l'Europe et du Japon, une chute spectaculaire des pays de l'Est et une croissance non moins spectaculaire de la Chine.

Dans le même temps, la répartition des différents types d'aciers s'est profondément modifiée : la part des produits longs a décliné au profit de celle des produits plats, notamment les produits revêtus.

Les aciers inoxydables connaissent, quant à eux, une croissance régulière de 2 à 3 % par an depuis plusieurs années.

Ces tendances très macroscopiques ne donnent que peu de renseignements quant aux propriétés des produits. On notera toutefois que l'aptitude au revêtement sera absolument nécessaire.

Pour aller plus loin, il faut détailler, ou plutôt, « segmenter » par marché. Pour chacun d'eux, dégager les points clés et tenter de les traduire en terme de propriétés attendues pour pouvoir, enfin, parler de métallurgie.

- points clés des marchés (fonctions demandées)	→	propriétés des produits nécessaires	→	type de métallurgie pouvant apporter les propriétés
- évolution globale du marché	→	évaluation des volumes concernés	→	faisabilité industrielle en terme de fiabilité et de volume

Nous ne prendrons ici qu'une segmentation grossière permettant des simplifications qui peuvent paraître outrancières. Cette façon de présenter a l'avantage de rendre l'exposé synthétique, mais a l'inconvénient de laisser dans l'ombre certains « détails » : marchés de « niche » ou attentes très particulières de marchés importants, qui peuvent poser de très intéressants problèmes métallurgiques.

De plus, Usinor étant plus particulièrement spécialisé dans les produits plats, ceux-ci seront délibérément favorisés.

Segmentation proposée :

- automobile,
- électroménager,

- bâtiment,
- emballage,
- quelques mots sur les produits longs.

On détaillera le marché automobile qui servira de canevas pour les autres marchés.

Automobile

Un très gros marché en volume (chaque véhicule contient au moins 500 kg d'acier), cependant pas le plus gros. Quelques grosses entreprises dominent le marché avec, pour chacune d'elles, une politique mondiale, à la fois pour les approvisionnements et pour la vente. En Europe, le volume global du marché varie peu mais le type de véhicule a beaucoup évolué. Les lignes de force concernent :

• L'environnement

La réduction des consommations est de nouveau un objectif très important. L'une des façons de l'atteindre est de **diminuer le poids des véhicules et d'alléger** les pièces, notamment celles qui tournent. Ceci ne doit pas se faire au détriment de :

- la **sécurité** qui est, en partie, responsable du gain de poids des véhicules dans les années précédentes, que ce soit la sécurité passive (longerons, renforts...) ou active (ABS, air bag, etc.) ;
- le **confort**, autre responsable de l'alourdissement par les nombreux moteurs électriques et la nécessité d'assurer un confort acoustique et thermique dans le véhicule.

• D'autres éléments sont importants :

- la **liberté de design** : il faut pouvoir réaliser des formes complexes par des moyens de mise en forme rapides (emboutissage, notamment) et/ou par des moyens d'assemblage rapides (soudage, clinchage, rivetage...);
- la **durabilité** : la résistance à la corrosion est notamment

un fait acquis. Il s'agit maintenant d'obtenir les propriétés à moindre coût. Un cas particulier cependant : l'échappement où la tendance est de passer à des pièces en acier inoxydable résistant de manière efficace à la corrosion et à la fatigue thermique ;

- **l'esthétique des surfaces** : surtout pour les pièces de peau, le fini de surface doit permettre un « tendu » et une réflectivité correcte de la peinture.

Les autres marchés

Dans le domaine des produits plats, les autres marchés ont des objectifs analogues à ceux de l'automobile avec, cependant, des poids différents.

Le *tableau I* donne une présentation unifiée (mais approximative) des attentes des différents marchés. La notation avec une, deux ou trois étoiles, reflète une appréciation subjective de l'importance que chaque marché attribue à telle ou telle propriété.

Ce tableau est à peu près valable (avec quelques adaptations) pour tous les types d'acier (aciers au fer-carbone, aciers spéciaux, aciers inoxydables), vendus sur ces marchés.

Même pour les produits longs, pour les quatre marchés du tableau, la situation serait à peu près la même. Il faudrait cependant mettre plus de poids dans la 2^e ligne « allègement » sur les aspects fatigue dans l'automobile ainsi que sur les aspects usure pour la 4^e ligne « durabilité à faible coût ». Pour le bâtiment, la résistance au feu est un aspect très important tandis que l'esthétique de surface l'est moins. En dernière colonne, on trouvera des orientations générales qui permettront de répondre aux attentes des marchés. Elles ne sont pas exhaustives, mais elles nous serviront de guide pour la suite de l'exposé.

Tableau I.

Attentes/Marché	Automobile	Emballage	Bâtiment	Électroménager	Orientations générales
Allègement à résistance égale	***	**	**	**	Aciers plus résistants ou plus rigides avec ductilité analogue
Obtention de formes	**	***	*	*	Aciers plus ductiles (emboutissage profond)
Durabilité à faible coût	**	— (V. alimentarité)	***	***	Revêtements à plus faible coût
Esthétique des surfaces	** pièces de peau :***	**	**	***	Aspect de surface : rugosité, planité. Peintures, coloris
recyclabilité	*	*	*	*	Acier infiniment recyclable
Réduction des coûts	***	***	***	***	Limiter le nombre d'opérations ; assemblage facile Différencier les produits en aval
Divers : sécurité, confort (dépend des marchés)	Tenue au crash, confort thermique et acoustique	Alimentarité	Résistance au feu	Confort acoustique	

Pour donner un poids global à chacune de ces orientations, on a cherché à pondérer les étoiles mises dans chacune des cases par l'importance accordée au marché (en vertical). Le résultat final sur 6 étoiles serait le suivant. Inutile de dire qu'un écart d'une seule étoile est peu significatif. Néanmoins, le classement obtenu ne paraît pas farfelu :

- Aciers plus résistants ou plus rigides avec ductilité analogue : ***** (5),
- Aciers plus ductiles (emboutissage profond) : *** (3),
- Revêtements à plus faible coût : **** (4),
- Aspect de surface : rugosité, planéité. Peintures, coloris : **** (4),
- Acier infiniment recyclable : * (1),
- Limiter le nombre d'opérations ; assemblage facile. Différencier les produits en aval : ***** (6).

Développements de la science métallurgique : approche « technology push » ou « seeds »

Là encore, une simplification abusive nous permettra de dégager des tendances. On se contentera de quelques mots-clés correspondant à des technologies émergentes pouvant répondre à certaines des demandes du marché.

Parlons de métallurgie au sens classique du terme :

- Génie des microstructures par des traitements thermiques adéquats : on parlera par exemple d'aciers multiphasés, d'aciers avec effet « TRIP » (transformation induced plasticity), ou d'aciers à grains très fins, voire ultrafins.
- Aciers très purs : ce sont presque des fers purs avec notamment très peu de métalloïdes tels que C, H, N, O, P, S...
- Utilisation de nouveaux procédés permettant d'atteindre industriellement de nouvelles métallurgies, avec deux grandes familles : les nouveaux traitements thermiques permettant des chauffages et/ou des refroidissements rapides, les nouvelles techniques de coulée près des

côtes finales dites « brames minces » et « bandes minces ».

- On pourrait aussi parler de métallurgie plus spéciale telle que les intermétalliques. Elles ne sont pas négligées mais elles concernent généralement des marchés de niches très spécifiques.

D'autres pistes concernent plus particulièrement les revêtements, secteur dans lequel se produit une explosion de technologies :

- Tout d'abord, les bons vieux revêtements au trempé (acier galvanisé) reprennent de l'ampleur au dépend des revêtements électrodéposés. L'évolution de cette technologie est loin d'être terminée.
- Cependant, apparaissent aujourd'hui un très grand nombre de technologies de dépôt en phase vapeur ou plasma sous vide. Leurs potentialités semblent immenses. Aucune n'a été industrialisée en sidérurgie.
- Enfin, on assiste à une explosion dans le domaine des revêtements de polymères avec un grand choix de procédés et de nouveaux types de revêtements.

Une autre voie de nouveaux matériaux peut également être explorée. Il s'agit des matériaux composites. Les sandwichs avec une âme en polymère et des parements d'aciers sont déjà produits mais en quantité très limitée. On peut aussi rêver d'aciers poreux ou renforcés par des céramiques plus légères, etc.

Impossible enfin de ne pas parler de l'impact des technologies de l'information, dans le domaine de la modélisation des procédés et de la métallurgie, pour ce qui nous concerne ici.

Pour terminer cet inventaire à la Prévert qui prétend n'être ni exhaustif ni cohérent, il faut dire un mot des nouvelles techniques d'assemblage par soudage, par collage ou par d'autres moyens mécaniques.

La *figure 1* fait schématiquement des regroupements entre les demandes du marché (« needs ») et les technologies émergentes (« seeds »). On voit qu'on peut faire trois regroupements que nous allons examiner rapidement pour rester dans le volume imparti. Les autres technologies évoquées ne seront pas détaillées alors qu'elles sont potentiellement intéressantes.

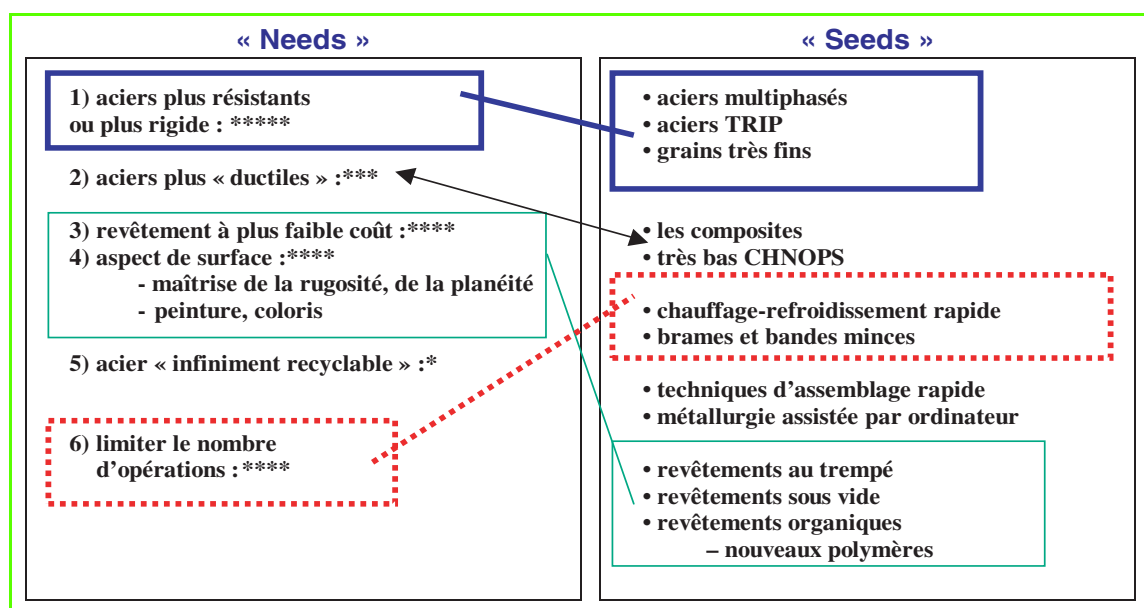


Figure 1.

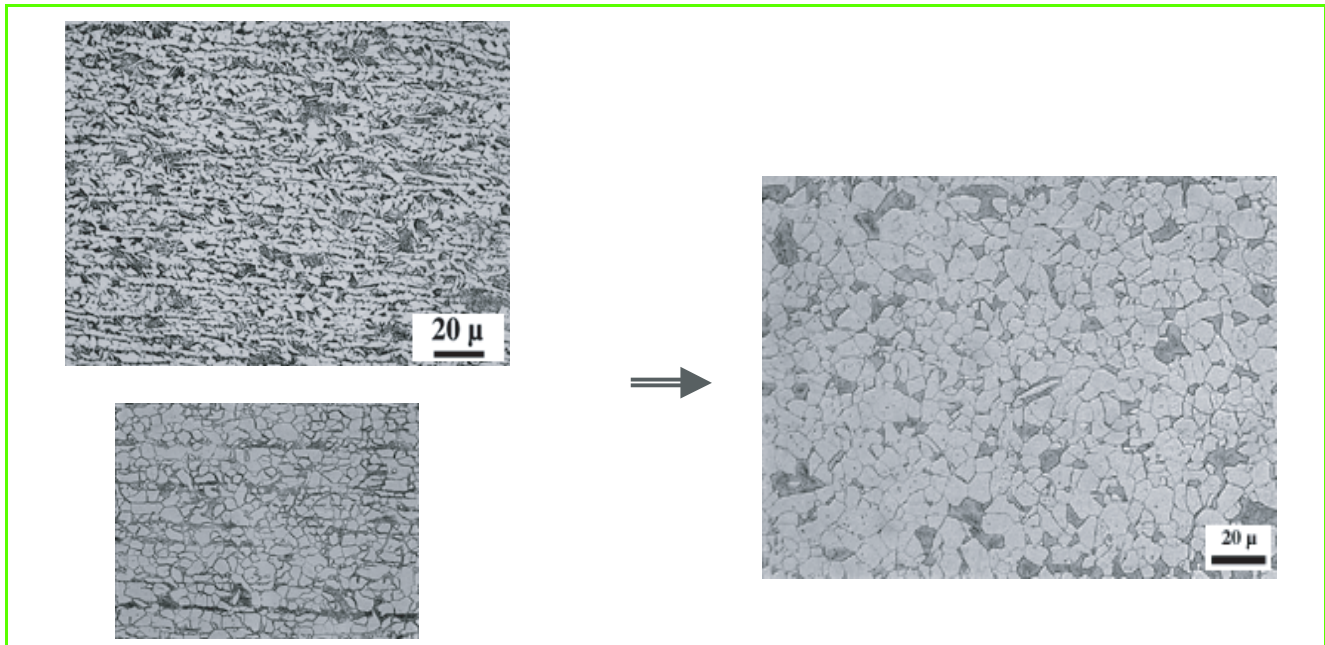


Figure 2 - A gauche : microstructure de deux aciers à haute résistance courants, le HR55 en haut et un acier HLE en bas. La microstructure est ferrito-perlitique.

A droite : un acier moderne dit « dual phase » avec trois phases : ferrite, bainite et perlite.



De nouveaux aciers plus durs qui gardent leur ductilité

Nous avons évoqué trois voies possibles : les multiphasés, les aciers TRIP et les grains fins.

Dans les trois cas, il s'agit d'obtenir de nouvelles propriétés en jouant sur la microstructure de l'acier.

- La première voie consiste en des traitements thermomécaniques qui permettent d'obtenir des mélanges astucieux de phases (ferrite, bainite, martensite...). Le compromis entre ductilité et résistance est alors excellent (figures 2 et 3).
- La deuxième voie utilise la propriété qu'a l'austénite métastable de se transformer lorsqu'on la déforme. Il s'agit de l'effet TRIP (transformation induced plasticity). Les propriétés, notamment de résistance aux chocs, sont étonnantes (figure 4).

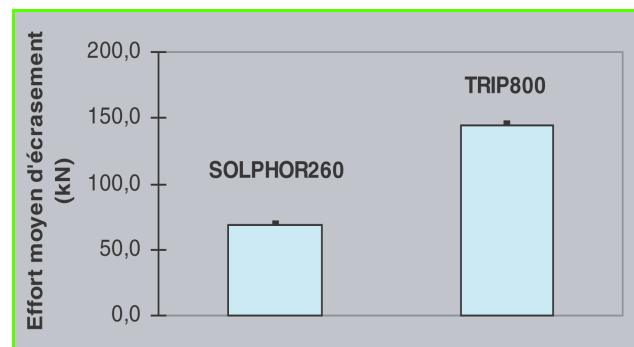


Figure 4 - Résistance à l'impact d'un acier classique re-phosphoré (Solphor 260) et d'un acier à effet TRIP.

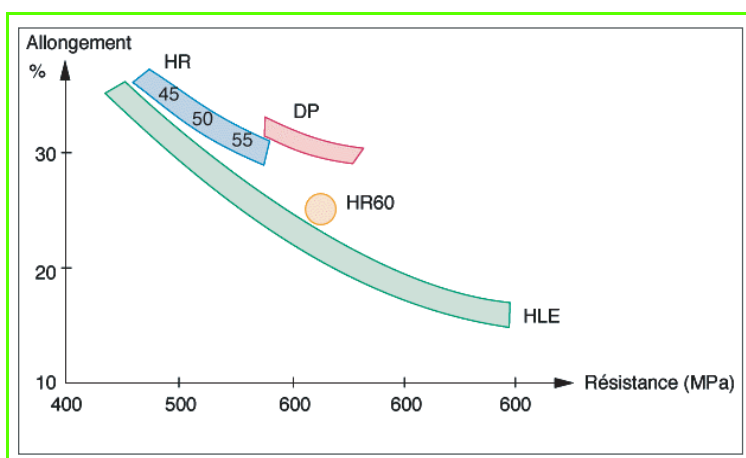


Figure 3 - Comparaison des propriétés des aciers dual phases (DP) et des aciers courants HR et HLE en terme de résistance mécanique et de ductilité.

- La troisième voie, plus exploratoire, consiste en une réduction drastique de la taille de grain afin d'améliorer à la fois la résistance et la ténacité. Des tailles de grain de l'ordre du micron sont accessibles. La résistance de l'acier est alors presque multipliée par 3.

Pour ces trois types de métallurgie, il faut absolument maîtriser de façon très fine l'histoire thermomécanique du produit. C'est difficile à réaliser avec les outils existants et des modifications, parfois importantes, sont nécessaires. Il en est ainsi des outils de refroidissement, de découpe et de soudure en ligne, etc.

Des revêtements nouveaux et/ou moins chers

Dans le domaine des aciers plats au carbone, la part des aciers revêtus augmente régulièrement.

Deux technologies existent industriellement : les revêtements au trempé et les dépôts par électrolyse.

Actuellement, les progrès en terme d'aspect de la première technologie ont été spectaculaires et beaucoup de nouvelles lignes de galvanisation fleurissent un peu partout au

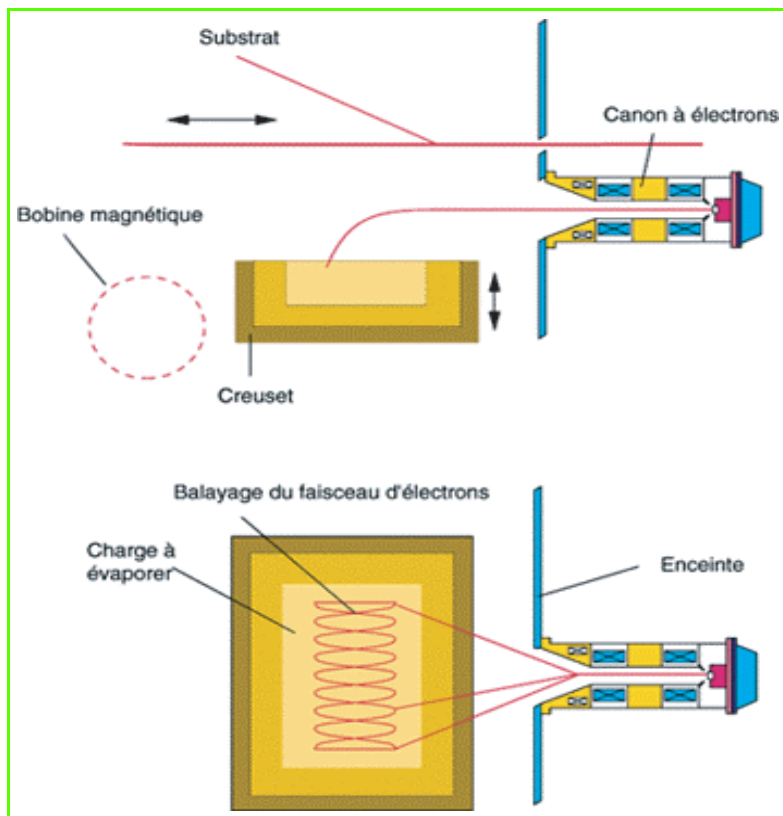


Figure 5 - Représentation schématique d'un procédé de dépôt sous vide utilisant des canons à électrons.

détriment des lignes d'électrodéposition. Cette évolution va sans doute continuer, ce qui impliquera une compréhension fine de la solidification du métal déposé (le Zn ou ses alliages) sur le substrat.

D'autres technologies sont émergentes : il s'agit de toutes les techniques de dépôt sous un vide plus ou moins poussé en phase vapeur ou en phase plasma. La figure 5 décrit l'une d'elles utilisant l'évaporation d'une cible grâce à un canon à électrons. Beaucoup de sidérurgistes étudient actuellement ces technologies et on peut parier que des investissements auront prochainement lieu. Elles ont l'avantage d'être très

propres et de permettre le développement d'une infinité de produits nouveaux en déposant plusieurs couches.

Par-dessus ces revêtements métalliques à base de Zn, Cr ou Al, on dépose de plus en plus des revêtements polymères pour des raisons d'esthétique et de résistance à la corrosion.

La technique employée actuellement, le coil-coating (figure 6), est concurrencée par toute une série de nouvelles technologies aux noms évocateurs : poudrage, extrusion, solid paint, spray, etc.

Ces techniques serviront peut-être à réduire les coûts, mais elles permettront surtout d'imaginer de nouveaux produits avec des performances améliorées.

De nouvelles technologies de production supprimant des opérations intermédiaires

Elles concernent essentiellement l'étape de solidification du produit. Dans les années 60, la coulée continue s'est imposée en substitution de la solidification traditionnelle par la voie lingot parce qu'elle supprimait une étape (le blooming) et parce qu'elle substituait un procédé continu à une opération discontinue.

De même, ont été développées récemment des techniques qui couplent les opérations de solidification et de laminage. Il s'agit des procédés dits de brames minces qui conservent 6 à 7 cages de laminoir pour aboutir à une bobine de tôle à chaud de 2 mm d'épaisseur. Cette technique se développe beaucoup et plusieurs usines ont été investies.

Une autre technologie est émergente. Il s'agit de couler de l'acier liquide entre deux cylindres refroidis à l'eau. Une

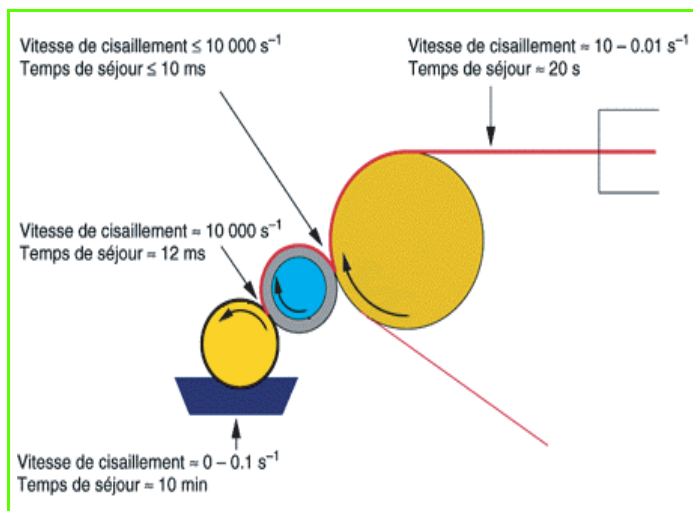


Figure 6 - Représentation schématique du procédé actuel de dépôts de polymère sur substrat métallique : coil-coating.

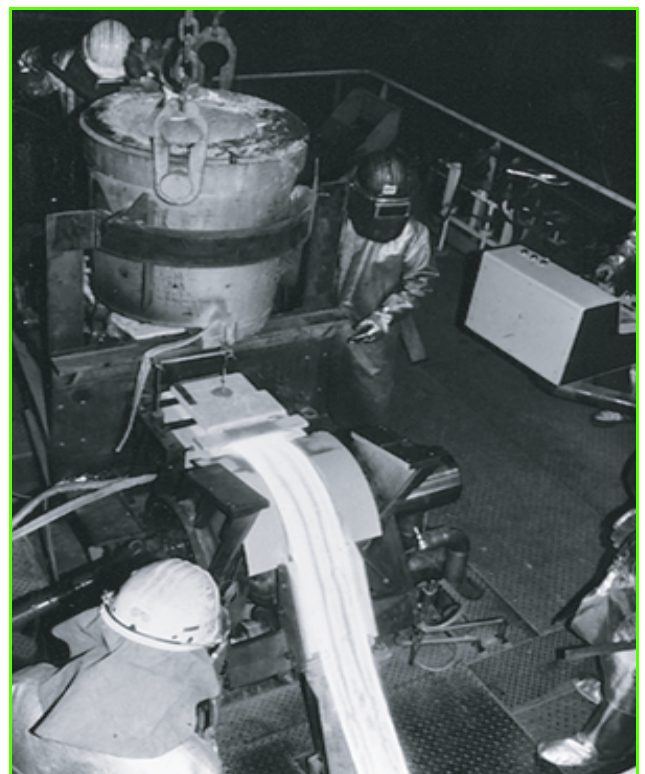


Figure 7 - Coulée directe en laboratoire de bandes minces solidifiées directement en 2 mm d'épaisseur.

bande d'épaisseur proche de la côte finale est alors solidifiée rapidement. Le nombre de cages de laminoir pourrait ainsi être réduit à une seule. Plusieurs groupes industriels tentent de la développer. Cependant, elle pose encore de difficiles problèmes pour bien maîtriser la solidification qui se produit en un temps extrêmement court.

Conclusion

Après ce rapide tour d'horizon, j'espère que le lecteur aura une impression de plusieurs sujets qui bougent dans le domaine des métaux ferreux.

Cette industrie, archétype de l'industrie du passé, est encore le lieu de beaucoup d'innovations techniques passionnantes. La place manque pour les décrire toutes. J'espère que

celles qui ont été sélectionnées ici donneront l'envie d'aller plus loin dans la découverte de ce métier.



François Mudry

est directeur du Plan, de la stratégie et des affaires scientifiques à la Direction R & D de Usinor*.

* Usinor, Immeuble Pacific, 11-12 cours Valmy, 92070 Paris-La-Défense Cedex.
Tél. : 01 41 25 88 68. Fax : 01 41 25 68 81.
E-mail : francois.mudry@irsid.usinor.com

