Brütsch/ Rüegger AG
Tubes acier
Althardstrasse 83
CH-8105 Regensdorf
Tél. 01/871 34 34
Fax 01/871 34 99
www.b-r.ch
Email : info@brr.ch
Certification ISO 9001:2000

Cahier technique 04

Elaboration de la structure de coulée

- Coulée et désulfuration de l'acier
- Acier non calmé et ségrégation
- Acier calmé et criques de retassures
- Le vieillissement de l'acier
- Coulée et structure de coulée de l'acier
- Dégazage sous vide et refusion

L’élaboration de la structure de la coulée

Par structure de la coulée, appelée également structure primaire, on entend la structure de l’acier lors de la coulée, donc dans les lingots d’acier. Ces termes ne doivent pas faire l’objet d’une confusion avec la fonte coulée dans des moules (comportant plus de 2 % de carbone) ou l’acier de fusion

Coulée et désulfuration de l’acier

A partir d’une matière première constituée de ferraille, de fonte liquide (issue du haut-fourneau) et de fer spongieux (provenant des installations de réduction directe), on fabrique de l’acier selon différents procédés ; essentiellement selon les procédés à l’oxygène LD, LDAC et OBM, ou dans un four Siemens-Martin, un four à arc électrique ou un four à induction. Pour plus de détails sur ce procédé, voir le chapitre 2.

De plus en plus, la qualité de l’acier ne dépend plus du procédé de fabrication. Le procédé Thomas présentait des inconvénients qualitatifs dus à un taux d’azote élevé et a été abandonné. Pour de nombreuses qualités d’acier, les fours et les creusets ne sont, dans une large mesure, plus utilisés que pour la coulée. La détermination de la composition définitive après désulfuration, dégazage et éventuellement aussi alliage avec d’autres éléments est alors réalisée après la coulée par métallurgie secondaire (désulfuration en poche, balayage avec correction analytique, traitement sous vide et procédé de refusion). Par conséquent, les agrégats de coulée sont considérablement allégés, les performances en sont donc accrues et la qualité de l’acier est meilleure.

Comme la *désulfuration* de l’acier reste limitée dans la plupart des procédés de fabrication ou est d’une mise en œuvre très coûteuse, la définition des teneurs en C requises a lieu immédiatement après la coulée dans la poche. Par exemple le procédé TN (Thyssen Niederheim) peut être pratiqué. Pour cela, on injecte au moyen d’un tuyau, des composants comportant du calcium comme par exemple de la chaux CaO ou du carbure CaC_2. Celles-ci fixent le soufre et on obtient rapidement des teneurs en S extrêmement basses (inférieures à 0,01 %).

L’incidence négative du soufre dans l’acier provient du fait que le Fe s’allie au S pour former du sulfure de fer (FeS) à basse fusion. C’est pourquoi, lors d’un laminage à chaud, le FeS au dessus de 1200° C, se présente sous forme d’une substance liquide aux joints des grains. Il rompt à température élevée et devient si peu déformable entre 800 et 1000° C qu’il casse au rouge.

On peut éliminer cet inconvénient grâce à l’adjonction de manganèse. Le MnS ne se liquéfie qu’au dessus de 1600 °C. C’est pourquoi tout acier doit contenir au minimum trois fois plus de Mn que de S en pourcentage (rapport Mn-S) ; par exemple, au moins 0,1 % de Mn pour 0,03 % de S. D’autre part, les inclusions de MnS sont si bien étirées lors du laminage que l’acier en acquiert une sensibilité dans le sens transversal : les paramètres de résilience et d’allongement à la rupture transversalement par rapport au sens de laminage se situent nettement en dessous des paramètres pris longitudinalement. C’est pourquoi il est avantageux d’avoir , à ce niveau, des teneurs en S faibles. Avec le procédé TN, les teneurs en inclusions oxydantes sont considérablement réduites, du fait que le calcium s’allie également à l’oxygène.

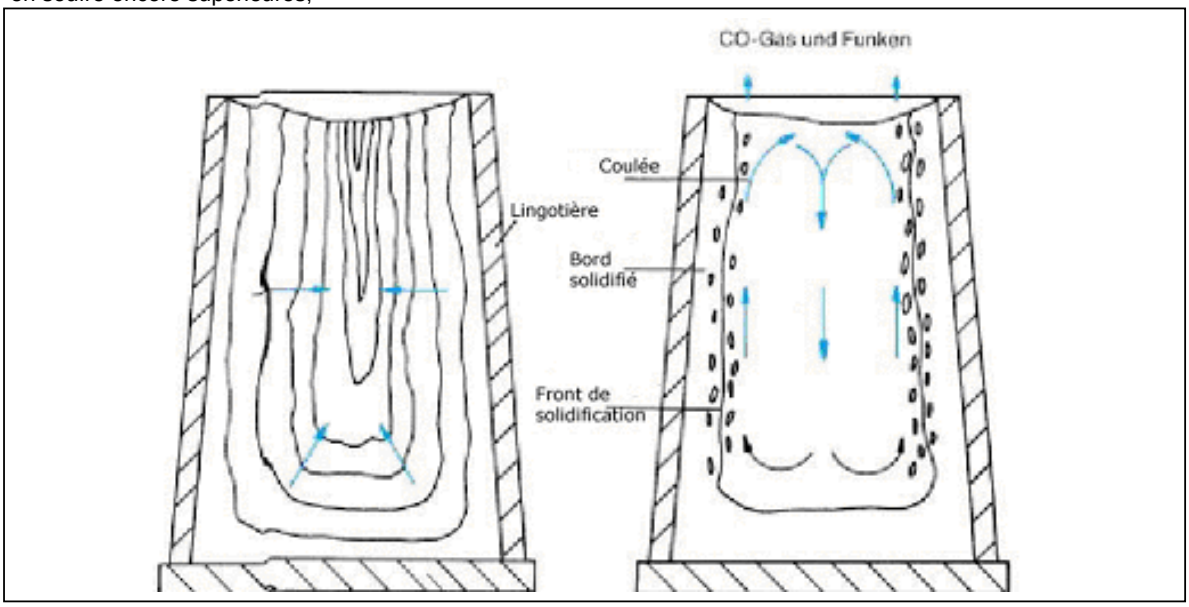
A ce stade, il faut définir un certain type de résistance à la rupture à haute température : la rupture au brasage. Elle se produit lorsque des métaux mélangés ou des alliages à bas points de fusion sont inclus dans l’acier, par exemple du cuivre (point de fusion 1084 °C), de l’étain (232 °C), du bronze ou du laiton. Ceux-ci pénètrent dans l’acier par l’intermédiaire de la ferraille (ferraille issue du produit lui-même ou fer-blanc), mais aussi au moment du brasage, et se cristallisent sur les joints des grains. Les conséquences à savoir des fissures, en sont préjudiciables lorsque de hautes températures et tensions interviennent, par exemple lors de la déformation à chaud ou lors d’utilisations spéciales. C’est pourquoi ces éléments ne sont souvent admis que jusqu’à certaines teneurs limites, par exemple un maximum de 0,25 % de Cu, 0,05 % de Sn. D’autre part, une certaine augmentation de la teneur en Cu accroît la résistance à la corrosion de l’acier. La pellicule d’oxyde tient mieux, et est donc parfois tout à fait intentionnelle (voir : acier résistant à la corrosion (chapitre 11). De plus en plus souvent, l’acier liquide subit, après la coulée, un *traitement de balayage*, au cours duquel on injecte dans la poche de l’argon en atmosphère inerte ou de l’azote. Ceci permet de faire mieux remonter les inclusions, d’obtenir une répartition de la température plus régulière dans la poche, d’où un effet favorable sur la structure interne de la coulée. Pendant le balayage, on réalise si nécessaire, des corrections analytiques en ajoutant par exemple du carbone, du manganèse ou autres.

Acier non calmé et ségrégation

Avant même ces traitements, l'acier peut être désoxydé pendant la coulée s'il doit être calmé. Ce *calmage* (baisse de la teneur en oxygène) a une influence décisive sur la structure interne et donc sur la qualité. Il convient donc d'expliquer cette étape.

Pour tous les procédés de fabrication d'acier, la coulée doit présenter une effervescence intense, afin d'atteindre une composition chimique et une température régulières ; de plus, il faut autant que possible, la débarrasser des impuretés et des gaz. En général, on y parvient grâce à une effervescence chimique. On ajoute, dans la coulée à forte teneur en carbone, de l'oxygène sous forme gazeuse ou du minerai qui forme avec le C de l'oxyde de carbone CO. Dans le procédé à l'oxygène, il faut également incorporer de l'oxygène pour éliminer de la fonte les autres éléments indésirables. Lors de cet « affinage », une partie du fer forme toutefois avec l'oxygène du FeO, localisé aux joints des grains, cela d'autant plus que la teneur en C est faible. Le produit issu du C-O est stable, sa quantité est d'environ 0,0025 %. Comme le FeO a un degré de fusion relativement bas, les aciers très tendres ont tendance à casser au rouge. C'est en particulier le cas lorsqu'ils comportent des teneurs en soufre encore supérieures, parce que dans le diagramme binaire Fe –FeS, un eutectique apparaît dès 930 °C. Pour cette raison, il serait souhaitable de réduire la teneur en FeO.

Souvent, un calmage s'impose en raison de la structure particulière qui se manifeste sur un *acier non calmé* suite à sa solidification. Si on le verse dans un moule en fonte (lingotière), la solidification commence sur la face froide et sur la base de coulée (au pied). Ce front avance lentement en direction du noyau et vers le haut (voir figure 1). Toutefois, selon le diagramme Fe-C, l'acier refroidi en premier est très pauvre en C, alors que le taux de C augmente dans la coulée. Le FeO et d'autres éléments comme le soufre, le phosphore, le manganèse, se comportent de la même manière. La couche superficielle est donc très propre, et les éléments s'enrichissent dans la coulée devant le front de solidification. Ces teneurs supérieures en FeO et en C réagissent cependant de nouveau réciproquement, en formant des bulles de CO, c'est-à-dire que l'acier est en forte ébullition. Ces bulles remontent en partie, et pour une autre partie d'entre elles, elles sont maintenues entre les cristaux en expansion et restent dans le lingot. Les bulles qui remontent fendent cependant la coulée vers le haut, ce qui la fait tourner dans la lingotière et provoque une aspersion (projection d'étincelles) (voir figure 2).



En raison de ce mauvais contact entre la coulée non purifiée et la couche superficielle propre, les éléments, qui sinon ont en principe toujours tendance à se répartir régulièrement, ont dans ce cas de la peine à diffuser. Il en résulte une *ségrégation majeure* prononcée correspondant aux fronts de solidification de la figure 1. Les teneurs les plus faibles se situent à l'extérieur, en bas, et les plus élevées au milieu. Ces différences de concentration sont particulièrement marquées pour les éléments comme le soufre et le phosphore, pour lesquels, pour les gros lingots, des différences du simple au quadruple sont possibles (par exemple de 0,015 à 0,06 % de S). Elles se produisent, dans une moindre mesure, également pour le carbone et le manganèse. Il faut donc faire attention, spécialement pour les aciers non calmés, à la différence entre l'analyse de coulée dans le four (par exemple, valeur moyenne de 0,03 % de S) et les analyses de pièces laminées (issues de la tête – du milieu – du pied du lingot).

La *conséquence de la ségrégation majeure* est pour le soufre, un risque accru de cassure au rouge en tête de lingot, et pour le phosphore, l'apparition de fissures de ségrégation. Celles-ci sont dues au fait que le phosphore fragilise considérablement l'acier. En particulier à basse température, la sollicitation de résilience diminue (fragilisation à froid). De plus, la résistance augmente de sorte que, lors du laminage, des fissures internes peuvent se produire. En cas d'une soudure jusque dans la zone de ségrégation, des défauts de raccordement peuvent facilement apparaître. Le phosphore entraîne également un risque de fissuration à la soudure, c'est-à-dire que des fissures se forment près du cordon de soudure. C'est pour ces raisons que la teneur en P ne doit, en général, pas excéder 0,04 %.

D'un autre côté, on souhaite pourtant parfois avoir une teneur en phosphore supérieure, jusqu'à 0,3 %, dans quelques cas particuliers : dans les aciers de décolletage (surface plus lisse lors de l'usinage par enlèvement de copeaux), dans l'acier pour écrous matricés à chaud (meilleur écoulement pendant le matriçage), dans les aciers résistant à la corrosion (la couche d'oxyde tient mieux et est plus épaisse, en combinaison avec du cuivre) et dans la fonte (meilleur remplissage des moules pour les pièces de fonderie minces).

Il existe plusieurs solutions d'attaque permettant de mettre en évidence les ségrégations, ainsi que pour le soufre , l'empreinte Baumann. Pour effectuer cette dernière, on trempe alors du papier photo (avec du bromure d'argent) dans de l'acide sulfuré dilué, on l'applique ensuite contre l'éprouvette meulée, en chambre noire. Après la fixation, les zones de ségrégation apparaissent sous forme d'une couleur brune.

La ségrégation déjà décrite précédemment se produit aussi bien dans les aciers calmés que dans les aciers non calmés. Elle n'est pas aussi risquée et peut être éliminée par un recuit.

Les gaz restant à l'intérieur d'un lingot d'acier non calmé forment une, voir deux couronne(s) de bulles ; une à l'intérieur et une à l'extérieur (voir figure 3). La bordure sans bulle est appelée le « lard » ; au niveau de la technique de coulée, son épaisseur doit être fixée à une épaisseur minimale de 10 mm. Ce n'est qu'à ce niveau que les bulles sont inoffensives. Lors du décalaminage ultérieur d'une couche superficielle dans le four de laminoir, aucun oxygène ne pénètre dans les cavités, de sorte qu'elles se résorbent parfaitement lors du laminage. Par contre, les bulles oxydées provoquent des fissures.

L'avantage d'un acier non calmé est son bas prix et l'obtention d'une couche tendre et propre qui se prête particulièrement à un certain nombre de procédés de traitement de protection de surface, comme par exemple l'émaillage et la galvanisation. De plus, la matière se prête bien à l'emboutissage, car elle est tendre et contient peu d'inclusions. La teneur en C maximale se situe autour de 0,24 % ; la proportion réduite d'oxygène ne suffit plus pour l'effervescence, car le produit C-O est stable.

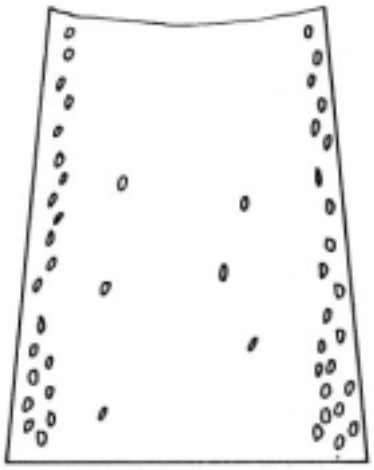


Figure 3 : Lingot d'acier non calmé en section longitudinale, avec couronne de bulles.

Les aciers alliés ne peuvent pas être fabriqués sans calmage. Soit les éléments alliés réagiraient avec l'oxygène, soit les ségrégations consécutives deviendraient trop fortes. Les aciers non calmés trouvent une application pour les tôles minces et feuillards traités en surface, le fil métallique, les pièces simples pour la construction en hauteur, l'acier à béton, les produits plats pour cintrage à froid et bordage, de nombreux aciers pour la construction navale, les aciers à teneur supérieure en S et en P (acier de décolletage pour vis, écrous, rivets et écrous matricés à chaud), le fil de soudure, les tuyaux de chaudronnerie. La résistance maximale à la traction se situe aux alentours de R_m = 400 N/mm². En raison de sa teneur en aluminium insuffisante, l'acier non calmé à une tendance au vieillissement accéléré.

Acier calmé et criques de retassures

Pour éviter les inconvénients exposés, presque tous les aciers de qualité et les aciers inoxydables sont *calmés*, c'est-à-dire désoxydés. De plus, on incorpore à l'acier dans le four ou à la coulée, des éléments qui fixent l'oxygène. Il s'agit en particulier du silicium, de l'aluminium, du manganèse et du calcium. Ceux-ci forment les oxydes correspondants qui resteraient dans l'acier sous forme d'inclusions préjudiciables si on ne veillait pas à les faire remonter. On y parvient, en général, par l'ajout simultané de plusieurs produits désoxydants.

Malgré cela, les aciers calmés comportent généralement plus d'inclusions que les aciers non calmés ; les aciers à faible carburation en contiennent plus que les durs, car peu de C implique beaucoup de FeO et, par conséquent, l'incorporation d'une plus grande quantité de produit désoxydant. L'effervescence dans la lingotière est stoppée par la fixation de l'oxygène et l'acier se solidifie lentement. C'est pourquoi il n'y a pas non plus de mouvement circulaire de la coulée, de sorte que les différents éléments concentrés sur le front de solidification peuvent facilement se répartir : la ségrégation majeure est minimale. On n'obtient pas non plus de couche superficielle tendre et propre comme pour l'acier non calmé. D'où l'apparition d'un autre défaut : *la crique de retassure*.

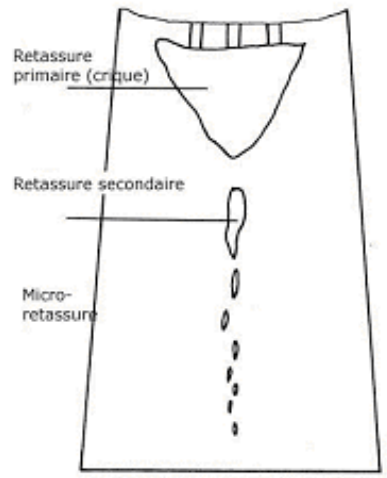
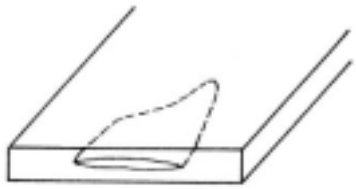


Figure 4 : Lingot d'acier calmé en

Figure 5 : Doublure dans une tôle



Il s'agit d'une cavité à l'intérieur du lingot. Elle se forme en raison de la contraction de volume d'environ 12 % lors du refroidissement de la coulée jusqu'à température ambiante. En premier lieu, une croûte solide se forme à l'extérieur (de même qu'un couvercle mince sur le dessus, à la tête, en raison d'un manque d'effervescence) et la zone interne se resserre également. Cette cavité de retrait doit se former là. Ceci se produit de façon plus marquée dans la partie supérieure du lingot, car si une cavité doit se former vers le pied, de l'acier liquide y coulerait d'en haut. La figure 4 montre un lingot solidifié en section longitudinale transversale, où rien n'a été fait pour limiter la retassure.

La retassure primaire se situe dans la tête, dont les faces sont toujours fortement oxydées et porteuses d'impuretés du fait que le couvercle est peu poreux. De plus, dans ce cas, la toute dernière coulée, qui a été enrichie par des éléments et des produits désoxydants, est solidifiée. En dessous se situe la retassure secondaire. Elle n'est pas oxydée et comporte moins d'impuretés. Les micro-retassures situées encore plus bas se forment parce que des cristaux isolés se développent plus vite en face du front de solidification, de sorte qu'aucune coulée ne peut y pénétrer d'en haut.

Une déformation à chaud réalisée correctement sur un lingot de ce type résorbe les micro-retassures de manière fiable. Elle a le même effet sur la retassure secondaire, mais n'en a aucun sur la retassure de tête. La conséquence en serait, dans ce cas, la formation de *doublures*, sous forme de séparations de matière très étendues (voir figure 5). Cela est particulièrement craint sur les tôles

Pour éviter ces défauts ou une baisse de rendement lors de la découpe de la retassure primaire étirée en longueur, on maintient la tête du lingot à l'état liquide pendant un long moment, pour que la coulée puisse s'infiltrer dans les cavités qui commencent à se former. A cet effet, on équipe les lingotières (pour les aciers calmés) de hottes isolantes en céramique et on verse sur l'acier un produit empêchant les retassures (voir figure 6).

En ce qui concerne les micro-retassures et pour obtenir une retassure de tête plus plate, il est avantageux de couler dans des lingotières coniques retournées avec hotte, parce que dans ce cas, les fronts de solidification progressent toujours avec une ouverture vers le haut (voir figure 9). Elles sont, en particulier, utilisées dans les usines de fabrication d'aciers inoxydables. Dans les deux cas, la tête du lingot doit être soigneusement découpée sur le premier train de laminoir, de sorte que des doublures ne devraient en fait plus du tout se produire. C'est pourquoi le rendement en matière est notablement plus faible pour l'acier calmé que pour l'acier non calmé sur lequel aucune retassure n'apparaît (environ 82 contre 92 %). Dans ce cas, le volume de contraction se répartit sur les bulles de gaz.

Figure 6 : Mesures prises pour réduire les retassures

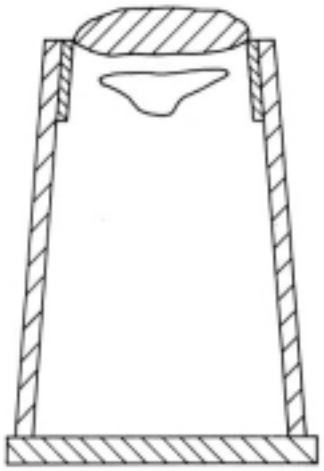


Figure 7 : Lingotière conique retournée avec lingot d'acier comportant des retassures

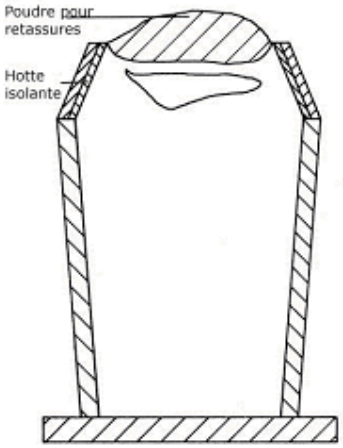
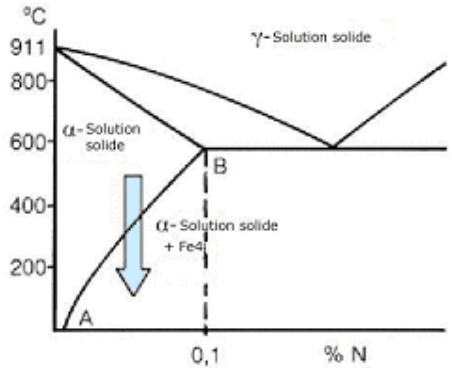


Figure 8 : Diagramme binaire fer-azote



La surface des lingots d'acier calmé comporte un nombre relativement important d'impuretés, car ici les produits désoxydants à haute fusion se séparent partiellement, en particulier l'alumine Al_2O_3. C'est pourquoi un nettoyage, un grillage ou un décolletage de la surface sont souvent nécessaires.

Pour concilier les avantages de l'acier calmé et de l'acier non calmé, en évitant leurs inconvénients respectifs, on a créé l'acier *à demi calmé*. Grâce à une faible désoxydation, les teneurs en C et FeO sont déterminées respectivement de manière à ce que l'enrichissement des deux devant le front de solidification ne provoque l'apparition de bulles qu'une fois que la tête du lingot a déjà formé un épais couvercle. C'est ainsi que cet acier comporte des bulles de gaz dans le noyau, mais est exempt de retassures et de ségrégations, alors que son rendement est aussi élevé que celui de l'acier non calmé. La teneur en C doit être limitée assez sévèrement à 0,1 à 0,23 %. On ne peut pas incorporer d'autres éléments alliés, de sorte que la résistance à la traction est maintenue dans des limites relativement étroites de environ 370 à 600 N/mm². Les grains des aciers à demi calmés ne sont pas d'une grande finesse (environ ASTM 5), d'où une ténacité relativement faible. Ces aciers sont utilisés en particulier pour la construction navale ainsi que pour certaines qualités d'acier de décolletage.

Grâce aux *aciers calmés à coeur ou en lingotière*, on peut répondre à des impératifs élevés aussi bien en ce qui concerne la qualité de la surface que l'absence de ségrégation. On ajoute alors la quantité d'aluminium nécessaire à la désoxydation dans la lingotière après avoir fini de couler et avoir attendu environ 3 minutes, lorsque le « lard » propre s'est déjà constitué. Les aciers de ce type sont utilisés particulièrement pour les tôles embouties.

Le vieillissement de l'acier

Les aciers non calmés et à demi calmés ont toujours tendance à un *vieillissement accéléré,* alors que l'on peut faire en sorte que les aciers calmés aient une bonne résistance au vieillissement. L'apparition de ce défaut redouté signifie une baisse de la ductilité ainsi qu'une augmentation de la résistance à la traction et de la limite élastique *au court du temps*. Elle est due à des taux d'azote non fixés. Ce processus, qui est également très important pour de nombreux nouveaux aciers très résistants et soudables, peut s'expliquer plus clairement si l'on étudie avec attention le diagramme binaire fer-azote (voir figure 8). En raison de la teneur maximale de 0,02 % en N dans l'acier, seul l'angle extérieur extrême présente un intérêt. On observe que tous les aciers suivent l'évolution indiquée par la flèche lors de leur refroidissement après le laminage à chaud. Au dessus de la ligne A-B, tous les atomes de N sont dissous régulièrement dans le Fe sous forme d'une couche de solution solide ; lorsqu'ils passent en dessous de la ligne, ils devraient migrer vers les contours des grains et former, dans un rapport de quatre atomes de Fe + un atome de N, la combinaison Fe_4N (nitrure de fer). Ce processus est très similaire à la migration de C déjà commentée et à la formation de Fe3C ; pour les aciers hyper-eutectoïdes, à la ligne S-E du diagramme Fe-C.

On le désigne par le terme de *précipitation.* Toutefois, alors que les atomes de C, plus petits et plus mobiles, sont encore, à température supérieure, largement en mesure d'atteindre les joints des grains lors d'un refroidissement normal, les atomes de N, plus inertes, n'y parviennent pas. Ils restent dissous dans le fer jusqu'à température ambiante bien qu'ils n'y aient alors plus de place. De telles solutions sursaturées ont tendance de se stabiliser au fil du temps, c'est-à-dire que les atomes de N migrent très lentement en direction des joints de grains. Sur leur chemin, ils trouvent dans le réseau de petits emplacements vident où une place est disponible pour eux et ils y restent. Cela rend l'acier plus dur à déformer, c'est-à-dire que sa ductilité diminue (*vieillissement naturel*). En fonction de la qualité de l'acier et du retrait, le vieillissement se manifeste déjà au bout de quelques jours ou quelques semaines.

On peut effectuer une étude pour déterminer si un acier a une tendance au vieillissement grâce à un« *vieillissement accéléré*» : l'acier est déformé à froid de 10 % et ensuite recuit pendant une demi-heure à 250° C. A cette température, les atomes de N migrent plus vite vers les emplacements vacants, de sorte qu'un contrôle après choc sur entaille fait apparaître une baisse des valeurs. A 250 °C, l'acier devient bleu, c'est pourquoi ce phénomène est appelé également fragilité au bleu.

Si on ajoute maintenant de l'aluminium à l'acier, celui-ci fixe l'azote pour former du nitrure d'aluminium AlN. Le vieillissement est réduit. En général, il faut avoir un taux d'aluminium de plus de 0,02 %. Comme le vieillissement est provoqué, outre par l'azote, également par d'autres éléments – même s'ils sont en faible quantité, par exemple par le carbone, le phosphore et l'oxygène ; une teneur en aluminium de cet ordre n'est pas l'indice d'un acier absolument exempt de vieillissement. Pour cela, il faut incorporer du vanadium V, du niobium Nb, du tantale Ta, du titane T et/ou du zirconium Zr, qui fixent également les autres éléments. Comme l'aluminium est aussi un puissant désoxydant, les aciers non calmés et à demi calmés sont sujets au vieillissement. Les aciers calmés ne sont naturellement plus résistants au vieillissement que lorsqu'ils contiennent de l'aluminium. Ils peuvent, par exemple, être calmés avec du silicium + du manganèse. La meilleure aptitude à l'emboutissage des tôles calmées, par rapport aux aciers non calmés, est due à l'affinement des grains provoqué par l'aluminium. Les 0,02 % d'aluminium indiqués précédemment représentent le taux global, c'est-à-dire la somme de Al_2O_3 + AlN + le surplus d'Al disponible. Ces deux dernières proportions sont, lors de l'analyse chimique par voie humide, solubles dans des acides et c'est pourquoi on les désigne également comme Al soluble à l'acide. Le Al_2O_3 contient, en général, 0,005 % d'Al. A un taux supérieur à 0,02 % d'Al. Ou 0,015 % Al, l'acier est aussi bien calmé que résistant au vieillissement et a aussi une granulosité fine.
De même, un acier est calmé à partir d'environ 0,2 % de Si, mais la plupart du temps 0,10 % de Si suffisent, car on désoxyde en plus, entre autres, avec du Mn.

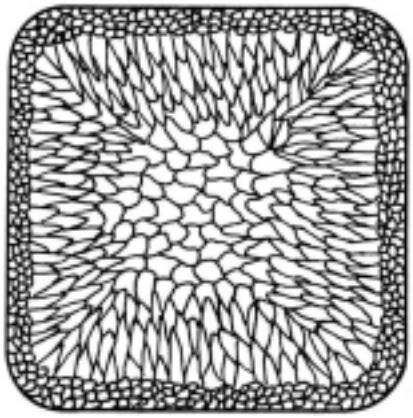
Une diminution de la teneur en azote améliore aussi évidemment la résistance au vieillissement. Ceci est *une des raisons* pour lesquelles les aciers Thomas affinés au « vent » (air, environ 79 % de N, 21 % d'O) ne sont plus fabriqués. En dessous de 0,001 % de N, le vieillissement ne se manifeste plus ; cependant, des taux aussi bas sont difficiles à établir du point de vue technique. Les aciers au SM et à l'oxygène se situent entre 0,002 et 0,01 % de N, les aciers issus de fours à arc électrique à un niveau plus élevé, jusqu'à 0,02 % de N.

Coulée et structure de coulée de l'acier

L'acier peut être versé dans les lingotières en coulée en chute ou coulée remontante. Dans le premier cas, la coulée « tombe» du haut de la poche, dans les lingotières et dans le deuxième cas, elle est versée grâce à un entonnoir sur la plaque de coulée en source, qui comporte des canaux ignifugés et répartit l'acier à partir du bas dans les différentes lingotières. Ces deux méthodes de coulée ont des avantages et des inconvénients : toutes deux sont à l'origine de défauts typiques de l'acier. En cas de coulée en chute, il est difficile d'éviter des *croûtes* dues aux projections en surface des lingots. Les lingots coulés en remontant contiennent souvent plus d'inclusions provenant de fragments détachés de l'entonnoir et de la plaque de coulée. De plus, des zones blanchâtres de type Mattsch peuvent apparaître lorsque l'acier forme en remontant, un couvercle solidifié et que celui-ci reste accroché à la paroi de la lingotière parvenant ainsi à l'intérieur du lingot. En fonction du déroulement de la coulée (température et vitesse entre autres), il peut en outre se produire des fissures longitudinales et transversales.

Après la coulée, de nombreuses qualités d'acier, en particulier celles qui sont alliées, ont tendance lors de leur refroidissement, à former des fissures. Ceci provient de leur plus faible conductibilité thermique qui entraîne un refroidissement rapide et donc une contraction de la couche extérieure, alors que, simultanément, le noyau des lingots est encore brûlant. Ils doivent donc soit être acheminés brûlants au train de laminoir, soit être refroidis très lentement.
Lors de la solidification se forme la *structure de coulée* typique, consistant en général en trois zones sur la section transversale d'un lingot (voir figure 9). Dans la zone du bord, la vitesse de refroidissement sur la paroi froide de la lingotière est la plus rapide, d'où la formation de nombreux germes, de sorte qu'un grain fin se forme. Dans la zone médiane, les grains s'alignent après le plus gros dégagement de chaleur, donc en direction de la paroi de la lingotière. Cela fait apparaître des grains allongés, alors que des grains moyens se forment au centre. Les grains allongés sont extrêmement préjudiciables, car les impuretés s'agglomèrent entre eux en épaisses couches solidaires les unes des autres. Par conséquent, le lingot d'acier devient relativement cassant. Cette structure de coulée doit en même temps être transformée par un laminage à chaud intensif pour obtenir des grains fins et réguliers si on veut que les produits soient utilisables. La structure de coulée conserve une influence jusqu'au niveau du produit fini. Plus sa granulosité est fine, meilleures sont les valeurs d'allongement et de ténacité.

Figure 9 : Section transversale d'un lingot d'acier avec structure de coulée



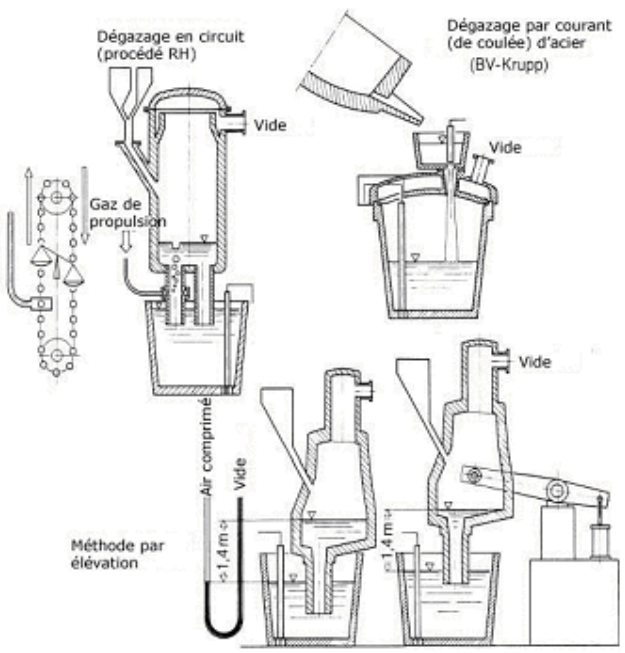
Sauf en cas de coulée initiale en lingotière, l'acier est de plus en plus coulé sur des *installations de coulée continue*. Dans ce cas, on ne fabrique pas toute une série de lingots individuels (par exemple, sur une coulée de 200 tonnes, 20 lingots ou brames de 10 tonnes), mais un plus petit nombre de barres aussi longues que possible (par exemple, 2 brames de 200 mm d'épaisseur et 2 m de large, ou 4 billettes de 100 mm de ∅). Ces formats sortent en continu d'une lingotière en cuivre ouverte vers le bas, refroidie à l'eau. Ils sont cintrés à l'horizontale, alors que le noyau des rouleaux est encore partiellement liquide, et sont ensuite arrosés à l'eau pour leur permettre de se solidifier rapidement, puis coupés à la longueur souhaitée. Les petits tronçons issus de la coulée continue correspondent aux ébauches des lingots ou brames, c'est-à-dire que les formats de coulée continue sont déterminés en fonction des tronçons finaux requis après la déformation. Du fait du refroidissement plus rapide, la granulosité de la structure de coulée est plus fine, de sorte que le degré de laminage nécessaire est plus faible que pour la coulée en lingotière. Pour les qualités basiques, il suffit à cet effet d'enlever une épaisseur d'un tiers à un quart ; pour les aciers inoxydables, on va jusqu'à un peu moins d'un dixième.

On s'est ainsi épargné une opération de laminage si on compare avec la coulée en lingots. De plus, le rendement de matière est nettement plus important du fait qu'il ne faut faire une découpe nette qu'une fois, à la fin. Ceci est valable d'abord pour la coulée séquentielle, lors de laquelle plusieurs coulées sont réalisées l'une après l'autre sans interruption. Le rendement se situe aux alentours de 97 jusqu'à plus de 99 %. La coulée continue est donc un procédé très économique.

Jusqu'à présent, on ne peut couler que des aciers calmés sur les machines de coulée continue. Il n'apparaît pratiquement pas de retassure, à l'exception de la dernière section, car on travaille en continu avec une tête liquide. Les défauts dont on redoute l'apparition sur la barre consistent en des fissures transversales et une ségrégation à cœur. On entend par là des teneurs en soufre et phosphore fortement accrues dans une zone strictement limitée du milieu de la barre. Ceci peut même provoquer une fissuration de la matière lors du laminage. Les fissures transversales apparaissent suite au cintrage de la barre semi-liquide. L'incidence de ces deux défauts peut cependant être diminuée par des étapes ultérieurs.

Grâce à un brassage électromagnétique de l'acier liquide dans la lingotière, on peut encore améliorer la structure de coulée, en particulier au niveau d'une plus grande finesse des grains. Lors du laminage de la coulée, sur certaines machines, la barre dans sa partie horizontale est directement déformée à forte température. Cela rend la structure plus dense du fait que les retassures se ressoudent.

Figure 10 : Installations de dégazage sous vide



Dégazage sous vide et refusion

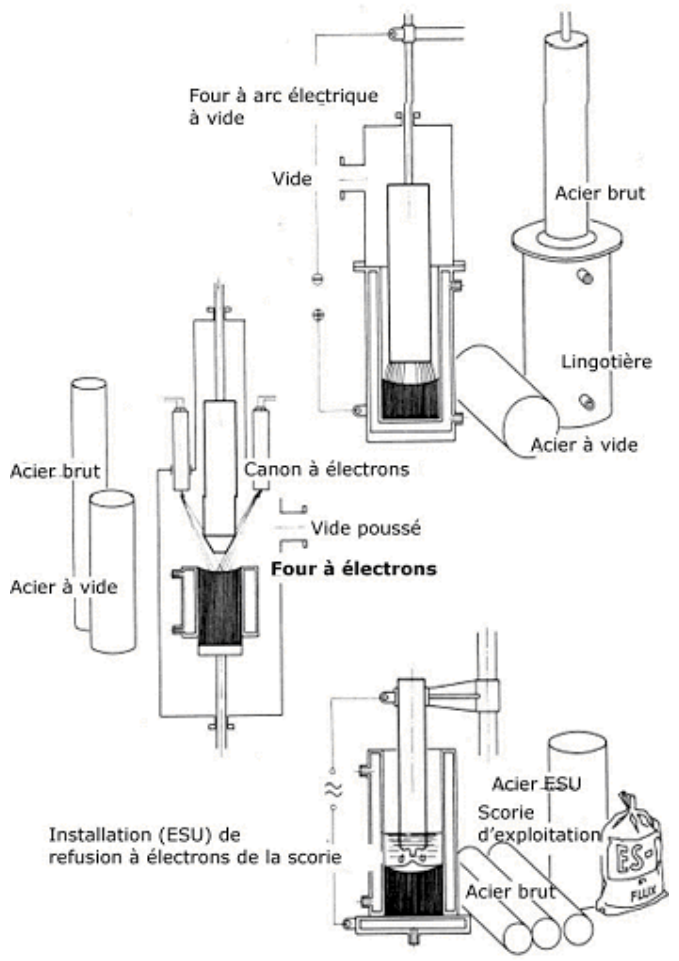
Avant la coulée, de nombreuses qualités d'acier sont soumises à un *traitement sous vide*. On divise alors la coulée, selon différentes méthodes (voir figure 10), en portions aussi petites que possible et on les expose à une pression d'air plus basse, de 1 mbar par exemple, produite par pompage de l'air. Les installations sous vide ont été développées pour aspirer de l'acier l'hydrogène H qui lui est préjudiciable (dégazage de l'acier) ; de plus en plus, on y effectue cependant aussi des opérations métallurgiques.

L'hydrogène H, issu de l'humidité sous n'importe quelle forme (eau = H_2O) pénètre dans l'acier liquide dont la solubilité à l'hydrogène est très élevée. Cette humidité diminue toutefois fortement lors de la solidification, de sorte que l'hydrogène devrait diffuser hors de l'acier pour s'échapper sous forme gazeuse. Cependant, une partie reste dans la structure à des taux faibles (moins de 3 cm^3 pour 100 g d'acier), dans les interstices et également aux endroits où le réseau est perturbé en bordure des inclusions.

Sous l'effet de la pression de l'hydrogène, l'acier se fend et forme ce qu'on appelle des « flocons », points de rupture qui ressemblent à des flocons de neige. En l'occurrence, les aciers pauvres en carbone sont beaucoup moins sensibles que les aciers durs (limite à environ 0,3 % de C). Ces deux causes sont à l'origine d'une réduction de l'allongement à la rupture et de la ténacité, donc d'une rupture prématurée de la matière (fragilisation par hydrogène). Cela se produit plus fréquemment pour les grands formats, par exemple pour les lingots à forger. On peut y remédier, outre par un recuit de longue durée par un traitement sous vide.

Sous vide, la baisse du taux d'azote reste limitée car les atomes de N diffusent trop lentement. D'un autre côté, toutes les réactions chimiques qui aboutissent à des produits finaux de forme gazeuse se déroulent plus vite sous vide, car ceux-ci sont aspirés par les pompes à vide. C'est particulièrement le cas pour la décarburation, qui consiste en une formation de gaz de monoxyde de carbone CO à partir du carbone C et de l'oxyde de fer FeO.

Figure 11 : Installations pour la refusion d'acier



En même temps que le CO, les taux de C et de FeO sont évidemment réduits dans l'acier. C'est pourquoi on ne peut produire à un coût économique les aciers à faible teneur en carbone, en dessous de 0,05 %, que sous vide. La baisse du taux de FeO signifie une désoxydation, sans émission de produits solides de désoxydation préjudiciables. Comme, en raison de réactions similaires, en plus du FeO, d'autres oxydes sont également éliminés, le degré de pureté de l'acier augmente. De plus, il est particulièrement avantageux d'ajouter à l'acier, seulement après son évacuation, des éléments tels que, par exemple, des désoxydants (des taux faibles sont alors suffisants, comme par exemple 0,02 % d'Al ou 0,2 % de Si) ou du titane, du niobium, entre autres, dans les aciers spéciaux d'emboutissage et les aciers micro-alliés à haute résistance, ou du silicium dans les tôles magnétiques ; éléments qui sinon se combineraient à l'oxygène. Ces trois dernières qualités doivent également avoir une basse carburation, et on a donc intérêt, à plusieurs égards, à les traiter sous vide.

Un problème particulier réside dans la fabrication d'aciers à faible teneur en carbone et à forte teneur en chrome, en particulier des qualités austénitiques inoxydables (acier 18/8). Lors de leur affinage dans n'importe quelle méthode de fabrication d'acier, l'oxygène ne se combinerait pas seulement au carbone, mais aussi au chrome et pénétrerait dans la scorie sous forme d'oxyde de chrome. En général, ce type d'acier est précoulé dans un four à arc électrique avec un taux de carbone relativement élevé et subit ensuite une décarburation de précision dans une installation sous vide (procédé VOD : vacuum oxygen decarburization). Le résultat est d'autant plus satisfaisant que le taux de carbone est faible.

Au lieu de le faire sous vide, on peut aussi effectuer une décarburation de précision sans ajout de chrome dans la scorie selon le procédé AOD (argon oxygen decarburization). Dans ce cas, on souffle de côté dans la coulée de fonte ou d'acier contenant du chrome, dans la partie inférieure d'un creuset analogue à celui du procédé LD, un mélange d'argon et d'oxygène. La dilution de l'oxygène avec le gaz d'atmosphère inerte a un effet équivalent à celui du vide. Le procédé VODK fonctionne sous vide directement dans le convertisseur.

A côté du traitement sous vide des coulées d'acier, pour les qualités supérieures d'aciers spéciaux, on réalise de plus en plus fréquemment une *refusion sous vide*. On part, dans ce cas, d'un lingot fondu et coulé en aciérie de manière conventionnelle, que l'on fait refondre et re-solidifier sous vide. En fonction de la température émise lors de la deuxième fusion, on distingue le procédé à arc électrique sous vide et le procédé à bombardement électronique. Au lieu du vide, la refusion est fréquemment effectuée dans une couche de scorie liquide (ESU = procédé de refusion à électrons dans la scorie) (voir figure 11).

Dans tous ces procédés, on réalise la refusion assez lentement, par exemple 20 heures pour un lingot de 15 tonnes, afin qu'un pied de bain liquide extrêmement plat se forme dans la lingotière (voir figure 12, comparée à la figure 1). De ce fait, le front de solidification n'est pas vertical, comme pour la coulée en lingotière et la coulée continue, mais à l'horizontale. Cette solidification orientée a pour conséquence que la structure de coulée est nettement plus satisfaisante ; en particulier, les grains allongés sont plus fins et verticaux. Il ne se produit pratiquement pas de ségrégations. Les inclusions, de même que les micro-retassures dans le noyau, sont extrêmement réduites. Le degré de laminage qui est autrement nécessaire pour provoquer une destruction de la structure, peut donc être par conséquent nettement plus faible. Ceci est particulièrement avantageux pour les gros lingots à forger. Pour ces deux procédés de refusion sous vide, en outre les teneurs gazeuses, de même que pour le procédé ESU, les teneurs en soufre sont tout à fait négligeables en raison de la désulfuration par la scorie. L'apparition de flocons d'hydrogène ou de bandes sulfurées est ainsi impossible.

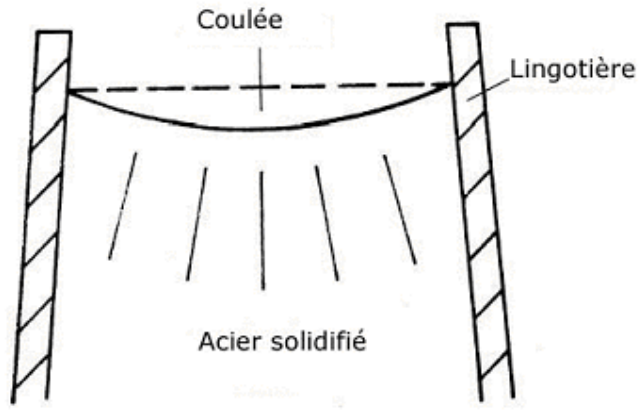



Figure 12 : Solidification orientée dans les installations de refusion