

Les efforts internes dans le fer et l'acier et leur influence sur la rupture.

M. ARTHUR WINGHAM, F. I. C (Torquay), dans le mémoire qu'il a présenté au Congrès, fait revivre l'ancienne théorie de la cristallisation comme une cause de rupture du fer et de l'acier ; mais il y introduit un grand nombre de modifications et, conformément aux principes modernes, il attribue beaucoup plus d'importance aux efforts naturels internes qu'on ne le faisait autrefois.

Bien que cette théorie soit aujourd'hui généralement abandonnée, les idées de l'auteur n'en sont pas moins dignes d'une sérieuse attention, parce que la constitution intime du fer et des aciers est encore un problème non résolu à l'heure qu'il est, malgré les données sérieuses fournies par la micrographie.

Nous donnerons donc, dans ce qui va suivre, un résumé assez développé du mémoire de M. Wingham.

Ainsi que ce dernier l'écrit, l'objet de cette notice est de contribuer à élucider quelques-uns des mystères relatifs aux allures physiques des métaux en général et du fer et de l'acier en particulier et de faire la lumière sur la cause des ruptures soudaines et imprévues des matériaux employés dans la construction des machines ou dans d'autres usages industriels. Les raisonnements de l'auteur sont basés sur les faits et hypothèses suivants : qu'il y a deux espèces d'équilibre auxquels un métal parvient, l'un physique et l'autre chimique ; que la tendance naturelle d'un métal composé est de prendre les formes les plus simples de combinaison capables d'exister à une température donnée ; que la rapidité du refroidissement, même dans les conditions les plus lentes, est encore trop grande pour permettre d'atteindre cette situation d'équilibre ; que l'équilibre est, dans la suite et à diverses reprises, troublé par des changements dans les conditions atmosphériques ou autres ; que l'accommodation à l'équilibre physique tend à favoriser celle à l'équilibre chimique ; que l'accommodation qui a été favorisée par de légères élévations de température l'est également par le refroidissement ; et que l'eutectique est le milieu à travers lequel le changement physique ou chimique se produit.

On admet maintenant que, dans l'acte de la cristallisation, les molécules d'une substance donnée affectent un certain volume et se disposent en contact intime avec d'autres, de manière à former un cristal dont le volume répond à la plus petite particule qui puisse exister séparément, les cristaux ainsi formés se groupant ensuite entre eux pour en former de plus grands. Plus le procédé de cristallisation sera lent et prolongé, plus les petits cristaux se grouperont eux-mêmes en formation serrée. En d'autres termes, plus une substance se refroidira lentement, qu'elle soit un métal solidifié ou une solution saline, plus les cristaux résultants seront grands. L'accroissement des cristaux se poursuit aux températures normales, ce qui est dû au groupement continu et au dépôt de menus cristaux en contact intime, et produit un cristal encore plus grand, exactement de même forme par rapport aux axes et aux faces, mais non pas nécessairement exactement de même figure, puisque les conditions locales peuvent être telles qu'elles gênent le libre développement dans toutes les directions. Par conséquent, une masse donnée de matière cristalline tend à se présenter en cristaux de plus en plus grands et plus compacts; il s'en suit que tout excès d'eutectique séparant les petits cristaux doit, quand ceux-ci sont amenés en contact plus intime avec d'autres, être expulsé dans les canaux plus grands qui séparent les faces des plus grands cristaux. Cette progression peut néanmoins être enrayée par certaines conditions telles que la pression.

Pendant le refroidissement lent, après solidification, d'une pièce d'acier, ses constituants tendront à prendre les formes les plus simples de combinaison chimique qui existent de préférence à la température atmosphérique normale et son caractère cristallin atteindra sa plus grande capacité sous les conditions existantes. Mais, le refroidissement étant plus rapide que l'accommodation à ces conditions, le progrès sera arrêté à un certain développement. En conséquence, dans la condition finale du refroidissement, il existe dans le métal du premier état, une certaine somme d'effort latent à l'accommodation, et l'on peut admettre que cet effort latent constitue une force potentielle disruptive.

Le métal peut, selon toutes les apparences, s'accommoder aux conditions générales de pression, de température, etc., ce qui peut être indiqué par sa structure, mais c'est seulement un état temporaire et l'accommodation naturelle, bien que lente, se poursuivra pendant des années. Conséquemment, le métal tend, d'une façon graduelle et persistante, à devenir plus cristallin et accumule une pression interne

expansive. Ce phénomène est influencé et accentué par d'autres conditions qui seront examinées plus loin. Par suite, nous devons nous attendre à trouver qu'un métal normalement refroidi avec un grand accroissement cristallin devient plus fragile qu'un métal semblablement préparé avec des petits cristaux, parce qu'il est évidemment plus porté à continuer son accroissement après refroidissement et à accumuler de la sorte de la pression interne. Une série de secousses ou un choc vient en aide à la force expansive et le métal se brise le long des plans occupés par les minces couches ou pellicules d'eutectique, en premier lieu de celles qui existent entre les grands cristaux et en second lieu de celles qui existent entre les cristaux plus petits, ou ce que l'on entend par joints de clivage. Etant admis qu'une masse de métal qui est cristalline retient l'eutectique entre les faces du cristal et ne l'expulse pas complètement à la surface extérieure, il est parfaitement admissible qu'un cristal formé lui-même de cristaux se comporte de même, bien que, sans doute, dans un sens plus restreint.

Jusqu'à ce jour, les plans de clivage d'un cristal ont été considérés comme étant le résultat d'un dépôt de couches sur couches ou de feuillets sur feuillets, mais une connaissance plus récente de la question fait rejeter cette manière de voir. Le professeur Ewing et M. Rosenhain ont observé que les cristaux d'une masse de plomb, quand elle est soumise à la compression au-delà de la limite d'élasticité grandissent, non pas par la superposition des surfaces, mais en poussant des bras et des branches laissant entre eux des vides qui sont finalement remplis pour former la face du cristal. On a souvent observé des accroissements en forme de fougères dans d'autres métaux. Un semblable accroissement doit se produire dans un certain milieu et celui-ci peut être constitué par l'eutectique. Dans la formation de ces cristaux, les vides forment les lignes de retraite vers la face achevée et si la cristallisation était arrêtée, ils en retiendraient une notable partie. Ces vides étant les lignes de retraite, doivent également être les lignes d'attaque, et, en cas d'échauffement, il est vraisemblable que l'eutectique attaquerait la face du cristal et pénétrerait dans ces vides. L'inverse se produirait en cas de refroidissement et il est facile de concevoir que si, par suite de pression ou de toute autre cause, les cristaux ne sont pas achevés, le métal devient une masse de cristaux soudés ou cimentés par interpénétration avec l'eutectique. Cela ne donne toutefois pas une explication suffisante de la manière de se comporter des métaux sous le traitement

mécanique, telles que la suppression de la structure cristalline et la production d'une structure plus serrée par martelage, etc., l'interpénétration et la réunion par soudure et forgeage, la faculté de plier, la rupture du métal sous l'effort, etc.

L'effet de la chaleur sur les molécules des constituants d'un métal est d'augmenter leur état vibratoire, et cet effet se continue jusqu'à ce que ces molécules s'unissent en masse, s'attachent, se dissolvent ou se combinent l'une avec l'autre.

L'effet de la compression est de restreindre l'amplitude de la vibration et le résultat est le même, les molécules devenant plus puissantes par le resserrement de leur sphère de vibration normale. Dans le cas d'un métal cristallin, le résultat serait que l'eutectique commencerait à dissoudre les cristaux et les attaquerait par les points de plus récente formation, travaillant dans la direction suivant laquelle la pression s'est le plus fortement fait sentir. Le même phénomène se produirait si l'on élevait la température et l'effet visible d'un traitement prolongé serait la disparition graduelle des contours aigus des grands cristaux. Le professeur Ewing et M. Rosenhain essayèrent d'observer les changements d'état cristallin par l'attaque chimique d'une surface de fer chauffée à une certaine température, mais ils ne purent constater l'altération, bien qu'elle se produisit. En procédant à une nouvelle attaque chimique (*etching*) de la surface, ils purent observer la nouvelle et plus petite structure cristalline dans le champ du cristal primitif dont le contour subsistait encore. Il est possible que les pellicules eutectiques existant sur la face des grands cristaux pénétraient dans les canaux de clivage, d'après le principe précédemment décrit et laissaient à nu les petits cristaux, lesquels, après une seconde attaque chimique, montraient une surface désorganisée en lieu et place de la surface plane uniforme originelle.

Ces expérimentateurs ont trouvé en outre que lorsque deux surfaces propres de plomb sont soudées à froid et recuites après, l'accroissement cristallin ne pénètre pas à travers la ligne de soudure. Mais, en versant un peu d'un métal plus fusible sur les faces avant soudure et répétant l'expérience, ils constatèrent qu'il n'existait plus de ligne marquant le contact des deux masses de plomb et que les cristaux pénétraient de l'une dans l'autre. Ceci semble prouver, jusqu'à un certain point dans ce cas, que l'accroissement cristallin d'un métal dépend d'un eutectique dans lequel les molécules peuvent partiellement se dissoudre et se regrouper.

Il est généralement admis que les eutectiques se contractent par la

solidification, mais, malgré toutes les recherches de l'auteur, ce fait n'a pas été prouvé d'une façon certaine. L'eutectique peut, considéré isolément, occuper moins d'espace qu'il ne le ferait quand les cristaux en sont séparés, et ainsi montrer une contraction, mais, tandis qu'il continuerait à se contracter pendant le refroidissement préalable à la congélation, rien ne prouve que le solide soit de volume moindre que le liquide au moment de la solidification. En fait, il est plus aisé de supposer qu'il occupait au moins le même espace, ou qu'il s'étendait ou essayait de s'étendre. Le bord frangé que l'on rencontre si souvent entre l'eutectique et le cristal semblerait montrer l'influence de la pression. Il s'explique probablement comme étant le résultat de l'interpénétration de l'eutectique et du cristal, et ceci indiquerait une cristallisation incomplète. Jusqu'où l'interpénétration frangée est-elle le résultat de la pression de la pellicule eutectique et jusqu'où la pression sur la pellicule eutectique est-elle le résultat de la cristallisation incomplète, ce sont des points délicats et difficiles à établir. L'eutectique et le cristal travaillent sans doute l'un contre l'autre jusqu'à ce qu'ils atteignent un équilibre correspondant à la pression finale. D'où, dans certains cas, l'intérieur d'un métal peut être comparativement libre de cristallisation, tandis que la partie extérieure peut être largement cristalline. Le D^r Stansfield et M. Stead ont tous deux rencontré cette condition dans des fontes. Dans d'autres cas, les positions peuvent être renversées, de manière que pendant le refroidissement de l'intérieur, il y ait diminution de pression, quand la structure plus largement cristalline serait à l'intérieur. N'est-il pas probable alors que l'eutectique soit le milieu dans lequel s'effectuent ces changements chimiques et moléculaires?

Si les vues précédentes relatives à l'équilibre chimique et physique sont correctes, il est aisé de concevoir comment les changements et les altérations se produisent dans un métal pendant son existence et d'expliquer quelques-unes des ruptures les plus conséquentes qu'on peut attribuer à une cause aussi faible en apparence. On peut aussi en tirer une explication de nombre de propriétés d'un métal tel que l'acier et des fluctuations de ces propriétés causées par l'introduction de divers éléments et par le traitement thermique. Par exemple, la limite d'élasticité ne peut-elle être le point auquel cesse l'influence eutectique? En réchauffant un acier qui a été soumis à un effort dépassant sa limite d'élasticité, il prend un état auquel correspond un autre point-limite d'élasticité et on peut répéter trois à quatre fois l'expérience, selon la nature de l'acier, chaque point-

limite ainsi obtenu étant plus haut que le précédent. Le recouvrement de l'élasticité se produit lentement par le refroidissement, mais rapidement quand le métal est chauffé, ne fût-ce qu'à une température de 100° C. Ce fait n'est-il pas dû à l'eutectique, sous l'influence d'un effort extérieur ou de la chaleur, favorisant un nouvel arrangement des cristaux et cimentant le tout par interpénétration avec les faces cristallines? S'il en est ainsi, alors on doit s'attendre à ce que la nouvelle limite d'élasticité soit plus élevée que la précédente, parce que le premier effort aura réduit légèrement la pression interne produite par la cristallisation latente ou incomplète et le métal en se réchauffant s'accommodera par rapport aux cristaux et à l'eutectique dans un état cimenté plus complet mais moins serré.

Conséquemment, il faudra une plus forte charge pour que l'élasticité cesse la seconde fois. Ceci peut-être répété jusqu'à ce que la charge correspondant à la limite d'élasticité et la charge de rupture soient pratiquement égales.

Si ce changement chimique ou moléculaire interne latent est réprimé par la pression, il doit être certainement influençable par tout autre cause externe, effort ou changement auquel un métal est soumis. Même au repos, le métal est soumis à l'action de la pesanteur qui est considérable dans une masse de cette nature quand elle appuie sur sa propre base et spécialement si elle est supportée en deux points éloignés. Alors, de nouveau, tout changement de température envoie une onde de détente ou de contraction de l'extérieur vers l'intérieur, chaque onde produisant une secousse dans les molécules, quelque bon conducteur que puisse être le métal. Ajoutez y toute vibration, oscillation, révolution, ou par dessus tout, toute secousse ayant spécialement un caractère d'extension, pendant l'emploi industriel du métal, et l'on comprendra facilement que toute particule de celui-ci est soumise à toutes espèces possibles de torsions et d'efforts provenant de causes extérieures. Dans ces conditions, les molécules, dans leurs vibrations, ont fréquemment l'occasion d'entrer en lutte avec l'eutectique en produisant des changements physiques et chimiques avec des arrangements et des accommodements nouveaux de toutes espèces. De tels changements se produisent sous l'influence de la chaleur et de la fusion, et il est aisé de comprendre qu'ils se produisent constamment, bien que lentement, aux températures ordinaires. A chaque degré de température correspond un certain état d'équilibre dans tous les métaux, simples ou complexes, et c'est seulement une question de température et de

constituants qui décide de la rapidité avec laquelle cette accommodation se produit. Plus la température est élevée, plus l'accommodation est rapide; plus les constituants sont mobiles ou peut-être l'eutectique, plus prompte est la nouvelle accommodation moléculaire.

Influence des efforts sur la cristallisation.

On peut se demander si un effort qui tend à réduire la pression interne aide la cristallisation. L'auteur soutient que cela a lieu à toutes les températures et de nombreux exemples pourraient être donnés de métaux devenant cristallins et brisants par l'usage. Il croit ne devoir citer qu'un exemple, celui des chaînes d'acier raccordant le câble d'extraction à une cage de mine. Ces chaînes deviennent rapidement cassantes et dangereuses et il n'y a guère de doute que cela ne soit dû à la répétition de l'effort de traction, aidé peut-être, dans une certaine mesure, par les petites différences de température qu'elles éprouvent entre le fond et la surface du puits. Il paraîtrait, conséquemment, qu'une forme de fragilité dépend en grande partie de l'achèvement des faces cristallines, ou, en d'autres termes, de la séparation du cristal d'avec l'eutectique. La non-existence d'un état d'interpénétration diminuerait la forte liaison ou cimentation des cristaux l'un à l'autre par l'intermédiaire de l'eutectique. Le réchauffement de ces chaînes fait disparaître la structure hautement cristalline résultant d'une attaque récente par l'eutectique sur les faces achevées des cristaux, et donne lieu à la reformation de grains fins convenablement cimentés entre eux. Il est ainsi possible d'expliquer comment un métal travaillant dans des conditions parfaitement normales et bien au dessous de sa force de résistance primitive peut graduellement subir une altération avec augmentation de la pression interne potentielle jusqu'à ce que enfin il se brise soudainement ou tout au moins qu'il s'y produise une fissure, symptôme précurseur d'une rupture.

Il a été démontré qu'une élévation de température de quelques degrés accélère grandement l'accommodation à l'équilibre, et l'on connaît des changements rapides qui se produisent sous la chaleur de la vapeur. Ce point soulève une question d'une grande importance pratique. Un métal parfaitement sain et travaillant dans des conditions notablement inférieures à celles que permet sa résistance aux températures normales peut, en quelques heures, devenir absolument impropre à l'usage, s'il est soumis à la chaleur de la vapeur en

même temps qu'à des oscillations ou vibrations et tout particulièrement si quelque partie travaillante éprouve des secousses.

Cette considération est fréquemment perdue de vue dans la préparation du métal pour l'usage à une température différente des températures normales. La tendance est de fournir une pièce de métal aussi légère que possible pour la construction, avec la moindre marge possible par rapport à la résistance trouvée à l'essai et garantie au moment de la fabrication. Le métal est durci ou recuit en partant de ce point de vue et la fourniture est faite pour l'effort exceptionnel à supporter et en vue de l'usure mécanique, tout le contrat supposant que le métal restera constant dans son état chimique et moléculaire; mais il n'est tenu aucun compte de la diminution de sa résistance due au changement d'état par suite de l'action de l'eutectique combinée avec les nombreux efforts internes et externes, naturels et artificiels auxquels le métal sera soumis. Quand il s'agit d'une machinerie légère et d'un travail de peu de durée, la question de la diminution de résistance du métal a peu d'importance; elle en a au contraire beaucoup avec un matériel pesant et une machinerie qui ont à supporter l'épreuve prolongée du temps. Cela est d'autant plus vrai que plus la masse est grande, plus il est difficile d'obtenir de l'uniformité et conséquemment plus le métal est sujet à des efforts internes qui sont encore accentués par de puissants efforts externes et qui, combinés, favorisent les changements de constitution intime. En pratique, on tient compte de cette circonstance en supprimant aussi complètement que possible toute masse superflue de métal.

Effort interne dans les moulages.

Dans les pièces coulées, il existe une autre cause d'effort interne qui est d'une grande importance quand il s'agit de grandes masses, mais qui est pratiquement nulle dans les petites. Dans une pièce de ce genre, le métal se solidifie de l'extérieur vers le centre et, avec le temps, les parties intérieures s'étant solidifiées, l'extérieur a pris un état de rigidité tel qu'il ne s'accommode pas promptement à la contraction du métal intérieur. Le mal s'accroît quand la température baisse. Conséquemment, l'intérieur est dans un état de tension qui n'a été que partiellement réduit par la retassure dans la première période et par la formation de cavités de contraction et le développement de la structure cristalline.

Dans une petite pièce de moulage, l'effort de contraction peut ne

pas être apparent. Dans une forte pièce, au contraire, les nombreuses fissures axiales et les criques témoignent du fait, tandis que la structure centrale cristalline témoigne d'une réduction de pression qui a produit la cristallisation. Nous avons ainsi une masse solidifiée et refroidie de métal dont pas un atome n'a été solidifié ni refroidi sous les conditions naturellement avantageuses pour produire un état de stabilité normale; chaque grain est plus ou moins en relation forcée avec ses voisins, de sorte que toute vibration détermine un effort de réaccommodation à travers la masse. Quand la température baisse, la différence entre l'extérieur et l'intérieur du métal diminue, mais la difficulté à l'accommodation est plus grande et le métal doit se rompre ou se fissurer pour donner lieu à une réduction de pression. Les relations forcées sous les conditions normales disparaîtront dans la cristallisation à travers le milieu des pellicules eutectiques. Le traitement mécanique les anéantit, surtout s'il est alterné avec des recuits, mais il n'est pas aisé de dire à quel point les efforts primitifs de moulage sont entièrement éliminés. Si le traitement énergique produit une interpénétration et une combinaison partielle de l'eutectique et des cristaux et si le recuit relâche la cohésion jusqu'à un état de flexibilité, alors les vraies conditions pour qu'un métal acquière de l'élasticité et de la résistance sont atteintes, particulièrement si ces opérations sont effectuées à des températures aussi basses qu'il est possible de le faire. Ceci nous amène en plein dans la question des théories de traitement thermique, ce qui est étranger à l'objet de ce mémoire, mais l'auteur est d'avis que les eutectiques et leur formation jouent un rôle très important par la production d'effets qui sont attribués par quelques personnes à l'allotropie et par d'autres à la solubilité des carbures dans le fer.

Questions essentielles de durabilité et de stabilité.

Si cette manière de voir est admise, il est manifeste qu'un métal, pour posséder la durabilité et la stabilité, devrait contenir des constituants qui ne se prêtent pas à une cristallisation ultérieure. La ségrégation, par conséquent, serait soigneusement reconnue dans l'essai d'un métal destiné à durer des années ou à être soumis à des températures élevées et variables. Les essais mécaniques à froid de la pièce sont insuffisants par eux-mêmes et ils devraient être combinés et effectués de manière à obtenir quelques indications sur la conduite du métal dans les conditions d'usage prévues. Deux métaux

peuvent donner également de bons essais et paraître pratiquement de qualité identique; néanmoins une tendance à former des cristaux dans l'un plus rapidement que dans l'autre peut les rendre complètement inégaux par rapport à leur durée. Sous ce rapport, la mobilité ou la fluidité de l'eutectique doit avoir une grande influence. Comme cette qualité est grandement influencée par les petites quantités et par le nombre des impuretés et des constituants additionnés, il en résulte que l'influence totale de ces corps agissant ensemble est de la plus haute importance. Ce que sont les eutectiques d'un métal compliqué comme l'acier, il est difficile de le dire, mais, dans les limites de température comprises entre 0° et 1,000° C, il y en a probablement beaucoup, chacun ayant son action dissolvante spéciale et devenant d'une nature plus complexe à mesure que la température s'élève. Ainsi, un acier, en se refroidissant, peut cristalliser partiellement hors d'un eutectique à haute température de corps complexes, lequel, à un point donné, peut se séparer en ses constituants avec évolution de chaleur, l'un ou l'autre desquels, à de plus basses températures changerait probablement de forme, et, en partie, avec des constituants cristallisables d'un caractère plus simple, produisant encore des eutectiques d'un ordre inférieur. Ceux-ci, de nouveau, se dissocieraient jusqu'à ce que la forme la plus inférieure et la plus simple d'eutectique fût atteinte. L'inverse se produirait par l'échauffement, avec la production, à une température plus élevée, d'une série de composés, dont le plus haut serait d'une nature plus complexe. Celui-ci, s'il se refroidissait subitement, n'aurait pas le temps de se séparer en ses divers éléments et on obtiendrait conséquemment un métal composé totalement distinct dans ses propriétés de dureté. Il peut contenir du fer durcissant ou du carbone durcissant, mais pourquoi ne peut-il contenir un mélange complexe dur lui-même? L'effet du recuit serait de permettre à la séparation des éléments naturels de se produire, partiellement ou totalement, suivant la température et la durée du recuit. L'effet du *revenu* (1) serait de permettre une mise suffisante en liberté de l'eutectique, ou une accommodation naturelle, pour produire une action enveloppante sur les particules dures restantes, de sorte que la fragilité résultant de l'absence d'un agent cimentant serait disparue, tandis que la dureté ne serait pas entièrement détruite, le résultat étant un métal dur dont les particules sont intimement liées ou cimentées par une petite trace d'un métal plus

(1) Le *revenu* (Ang. *annealing*) est le *recuit* des aciers trempés.

doux qui lui communique de la résistance et de l'élasticité. S'il en est ainsi, il est clair qu'un si petit pourcentage d'impuretés peut avoir un effet aussi grand sur les propriétés d'un métal, puisqu'il a une influence sur la fluidité, la mobilité ou la plasticité des constituants avec lesquels il entre en combinaison. On peut aussi expliquer pourquoi le surchauffement d'un métal est quelquefois aussi désavantageux qu'un échauffement insuffisant.

Il est probable que l'eutectique et son influence devront être pris en sérieuse considération dans les recherches métallurgiques de l'avenir, non seulement en ce qui concerne le fer et l'acier, mais aussi en ce qui concerne le travail mécanique de tous les métaux. En même temps, l'application de cette influence à de nouvelles investigations peut, dans beaucoup de cas, contribuer à faire la lumière sur des difficultés jusqu'ici inexplicables.

Le métal idéal pour la longévité industrielle.

Le métal idéal au point de vue de la longévité industrielle serait d'abord celui qui contiendrait une quantité petite mais suffisante des constituants qui formeraient avec lui un eutectique ayant un point de solidification non fort éloigné de celui des métaux qui s'en séparent. Cet eutectique ne doit pas être trop mobile ni trop plastique, de sorte que les cristaux formés en premier lieu, et conséquemment petits, pendant le refroidissement, soit de l'état liquide ou solide, peuvent être rapidement suivis par la solidification ou le durcissement de l'eutectique et la cimentation avec ce dernier. De cette façon on obtiendrait un métal de texture à grains fins.

Ce résultat serait cependant atteint avec la quantité minima d'eutectique.

Les fins cristaux seraient enveloppés et cimentés ensemble par des pellicules d'eutectique, dans lesquelles ils seraient incapables de s'arranger eux-mêmes sous forme de grands cristaux. Ils formeraient alors une masse capable d'être livrée à un usage industriel important sans altération ni dépréciation.

Cet aspect de la question fournit une explication de l'action de certains métaux, tels que le nickel, etc., qui donnent une haute limite d'élasticité et une grande résistance à l'acier.

Le nickel, moins fusible, produit un eutectique à point de fusion élevé, qui se solidifie et se durcit aussitôt après la séparation des petits cristaux d'acier ou d'acier au nickel quels qu'ils puissent être

et lie le tout fermement ensemble et empêche, par le manque de mobilité, les changements ou accommodations de se produire dans la suite dans la masse par la continuation du refroidissement et conséquemment par l'usage. C'est par l'emploi de tels métaux avec des eutectiques à haut point de fusion que nous devons chercher le futur développement de l'acier pour les usages industriels fatigants et prolongés.

Il est manifeste que les métalloïdes et d'autres corps ne devraient être retenus qu'à leur plus basse limite possible, de manière à ne pas produire d'eutectique superflu, parce que cet eutectique, non seulement affaiblit le métal dans sa condition première, toutes autres choses égales d'ailleurs, mais nuit à la stabilité de celui-ci dans son emploi industriel. Il facilite la réaccommodation à la forme cristalline et de là rend le métal moins durable sous les conditions ordinaires d'usage. Ce fait a été démontré avec les aciers ordinaires et a conduit à donner à un acier doux la préférence sur l'acier à haute teneur en carbone, partout où le premier peut être adopté.

L'acier doux est plus régulier en moulage, avec moins de séparation de l'eutectique, et, pendant le forgeage ou tout autre traitement mécanique, il est plus stable dans la manière de se comporter. Il y a peu ou pas de séparation de l'eutectique, ou ségrégation, et le produit fini est constant en composition. Un acier qui montre de la ségrégation pendant le traitement mécanique ne devrait jamais être employé pour quelque usage requérant la durée sous un effort vibratoire, parce que la ségrégation montre que le métal contient une quantité anormale d'eutectique ou même un eutectique doux ou plastique qui favorise la cristallisation et la séparation.

S'il a cette tendance pendant qu'il est chaud, il l'aura encore, quoiqu'à un moindre degré quand il sera froid, et il la développera tôt ou tard selon les conditions d'emploi.

On peut admettre que plus bas est le point de fusion du constituant étranger formant l'eutectique avec le métal, plus bas est aussi le point de fusion de cet eutectique; qu'en outre, plus le constituant étranger est complexe, ou, en d'autres termes, plus est grand dans le métal le nombre d'éléments étrangers, plus bas encore sera le point de fusion. Alors, encore, plus le point de fusion est bas (et par ceci il faut entendre le point de ramollissement de l'eutectique par rapport au point de fusion du métal principal), plus ce métal sera rendu grandement cristallin et fragile. L'effet sur le fer du phosphore à basse température de fusion contraste sous ce rapport avec celui du silicium à haute

température de fusion. L'eutectique ne serait pas trop nuisible dans les cas où un métal aurait à supporter un fort ou rapide traitement mécanique, parce qu'alors la fracture se produirait vraisemblablement par manque de rapidité d'accommodation. Aussi est-il convenable d'avoir une petite quantité de phosphore présent pour produire un eutectique plastique et ainsi faciliter l'accommodation à un traitement mécanique énergique. D'autre part, un tel eutectique favoriserait une cristallisation ultérieure du métal par le refroidissement. Ceci est rendu évident dans les aciers phosphoreux où la cristallisation par refroidissement relâche l'eutectique mou et la pression ainsi produite expulse une partie de celui-ci directement jusqu'à la surface extérieure. Il est probable que l'action dissolvante ou combinante de l'eutectique sous l'influence de la pression ou de la chaleur doit être considérée comme le facteur déterminant dans le traitement mécanique et dans la manière de se comporter des métaux.

Un équilibre parfait ne peut être atteint.

Une chose est tout à fait certaine, c'est qu'un métal lutte toujours pour s'accommoder aux conditions variables extérieures, tout au moins aux changements dans la température atmosphérique, même en l'absence de toute autre cause. Comme les variations sont rapides et les accommodations lentes, un équilibre parfait n'est jamais atteint et un nouveau changement dans l'arrangement de ses molécules tend toujours à se produire avec des influences variant vivement. Il est manifeste que toute force interne sera favorisée par cette incessante activité moléculaire et essayera de s'adapter à des conditions plus favorables. Conséquemment un métal subit constamment des efforts internes et des changements, et il est probable qu'il s'y crée ainsi une altération interne sans le moindre signe extérieur. Le premier symptôme est, soit une rupture soudaine, soit une fissure qui peut être ou non aperçue avant la rupture. La grande majorité des défauts des machines sont sans doute dus à l'action de semblables efforts et changements internes.

Le sujet est tout à la fois d'intérêt scientifique et d'importance pratique. Il est de grande importance pratique dans le cas de constructions appelées permanentes, spécialement lorsque ces constructions sont pesantes et sujettes à des vibrations ou à des chocs. En pareil cas, le plus grand changement ou altération se produira

aux points où le choc se produit. Conséquemment un acier de construction fort et dur, actuellement dans les limites de la spécification, peut, dans le cours d'un petit nombre d'années, développer quelques-unes des propriétés que l'on rencontre plus généralement dans la fonte.

Le plus récent exemple de ce fait est l'accident du pont de Brooklyn. Il paraît avoir été causé par la rupture des tringles de suspension verticale du tablier aux câbles. Les tringles présentaient sans doute une marge considérable de résistance en prévision d'un trafic lourd et intense et il est difficilement admissible que les ruptures aient été causées par un trafic exceptionnel seul. Il est plus probable que la vibration répétée et la diminution de la pression interne par le persistant effort de tension a accéléré une tendance excessive du métal à cristalliser et a ainsi réduit sa ténacité. La stabilité interne de l'acier destiné aux constructions est manifestement digne d'une sérieuse considération quand, par un choix judicieux du meilleur métal à mettre en œuvre au point de vue de la durée, on peut prévenir la rupture relativement prématurée d'un aussi important ouvrage d'art.

Nous croyons utile de compléter cette note en faisant connaître l'opinion, contraire à celle de l'auteur, émise par un autre métallurgiste éminent. Nous résumerons à cette fin les idées émises par Ledebur, dans son *Manuel de métallurgie*, sur l'influence des ébranlements répétés (t. II, p. 232). L'auteur rappelle d'abord que l'on a prétendu autrefois que le fer soumis à des vibrations pendant longtemps éprouvait dans sa texture une transformation ayant pour objet de diminuer sa résistance et sa ténacité. Le fer nerveux tenace se changerait graduellement en fer à grains cassant, comme s'il était chauffé à une température voisine de la fusion; l'on attribuait à cette cause la rupture des pièces en service depuis très longtemps. Cette opinion parut confirmée par les essais de Woehler qui datent de 1870 et avaient conduit leur auteur à la loi suivante :

« La rupture d'un corps peut être obtenue en le soumettant un » assez grand nombre de fois à des actions mécaniques qui sont loin » d'atteindre la limite de résistance qui le caractérise. »

Des recherches plus récentes, continue Ledebur, ont montré que ces actions devraient dépasser une certaine valeur et qu'elles ne produisent pas de changement d'état ou de texture du métal.

Rappelant que l'aspect du métal dans la cassure dépend du moyen employé pour obtenir celle-ci et qu'un fer nerveux brisé brusquement sans flexion peut présenter une cassure à grains, il fait remarquer que ce sont précisément des ruptures par efforts brusques qui ont fait croire à une transformation de la texture du métal. *L'on a donc simplement pris l'effet pour la cause.*

Ledebur donne ensuite les résultats des essais de Bauschinger et de Bebelusky, respectivement en 1878 et en 1888, faits sur des maillons de chaînes de ponts en service depuis 25, 40 et 49 ans; on a comparé ces maillons à d'autres de même âge restés en magasin et à des maillons neufs.

Tous les échantillons essayés étaient restés nerveux et avaient conservé leurs propriétés mécaniques. Après des essais de laboratoire sur des barres de fer ou d'acier, Bauschinger a enfin formulé la conclusion suivante : « La structure du fer et de l'acier n'éprouve aucun » changement par suite d'ébranlements répétés fréquemment, même » plusieurs millions de fois. »
