

But de la technologie

La technologie horlogère s'adresse au praticien auquel elle fournit des données scientifiques propres à faciliter et à améliorer la qualité de ses produits. Elle étudie les matières premières employées par l'horloger, leurs provenances, leurs transformations et leurs propriétés; cette étude permet d'en faire un choix plus judicieux.

La technologie examine aussi les procédés de travail et l'outillage, puis les moyens de mesures et de vérifications qui en s'améliorant obligent le praticien à perfectionner son outillage, ses procédés de travail et à rechercher les matières qui lui permettront de rendre de plus en plus facile la fabrication de produits de plus en plus parfaits.

Matières employées par l'horloger

Les métaux

Propriétés générales: les métaux sont généralement solides à la température ordinaire, le mercure est liquide dès $38,9^{\circ}\text{C}$. Ils peuvent être polis ce qui leur donne un éclat dit métallique.

Les métaux sont généralement lourds; leur densité c'est-à-dire le poids de 1cm^3 exprimé en gramme est presque toujours plus grand que 1 qui représente la densité de l'eau à la température de 4°C .

Densités

Métaux

Platine	21,50
Or	19,32
Mercure	13,59
Plomb	11,36
Argent	10,53
Cuivre	8,92
Fer	7,84
Étain	7,40
Zinc	7,10
Aluminium	2,56

Alliages

Laiton	7,3 à 8,4
Maillechort	8,3 à 8,6
Bronze	8,4 à 9,2

La densité augmente lorsque la température diminue

Conductibilité

Définition: la conductibilité est la propriété d'un corps de bien conduire la chaleur et l'électricité. En général les métaux conduisent bien la chaleur et l'électricité pour cette raison on en fait des corps de chauffe et des conduites électriques.

L'Argent est le meilleur conducteur: en représentant sa conductibilité par 1000 on obtient le tableau suivant pour d'autres métaux.

Conductibilité

Métaux

Calorifique

Électrique

Argent	1000	1000
Cuivre	736	835
Or	532	585
Aluminium	450	480
Fer	179	130
Plomb	86	107

Fusion

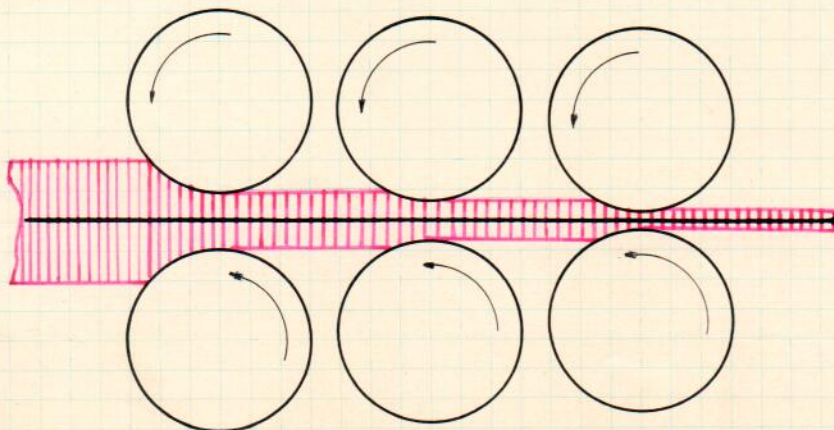
En augmentant suffisamment la chaleur on arrive à fondre les métaux. Cette propriété est importante parce qu'elle permet de séparer le métal qui se trouve dans un minerai, de mélanger plusieurs métaux pour former des alliages, ou de couler du métal fondu dans des moules pour obtenir des objets de forme déterminées. La température à laquelle un métal devient liquide s'appelle son point de fusion

<u>Métal ou alliage</u>	<u>Point de fusion</u>
Platine	1773°
Fer	1530°
Acier	environ 1400°
Cuivre	1093°
Laiton	1075°
Plomb	335°
Étain	226°

La malléabilité

La malléabilité est la propriété d'un corps de se laisser transformer en lames de plus en plus minces par le passage dans le laminoir ou par le martelage. L'or est très malléable on peut en faire des feuilles de 1 dix millième de mm d'épaisseur. Les parties principales de la machine à laminier ou laminoir sont des cylindres dont les axes parallèles ont une distance réglable. Le laminage se fait à froid ou à chaud.

Laminoir



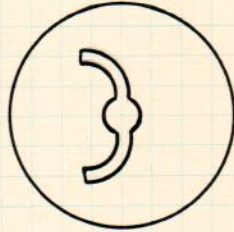
La ductilité

La ductilité est la propriété d'un corps de se laisser étirer en fils de plus en plus fins par le passage dans une filière.

La filière est une plaque d'acier trempé, percé de trous de formes diverses selon le profil du fil ou tringle à obtenir.

On fait des filières en diamant et en métal dur (wydia)

Filière pour



ébauche de clef

Par le laminage ou l'étirage, les molécules qui composent le métal sont fortement pressées les-unes contre les autres; le métal est écroui et devient cassant. Pour lui rendre sa malléabilité et sa ductilité il suffit généralement de le recuire c'est-à-dire de le chauffer au rouge et de la laisser refroidir lentement.

Les bandes de laiton ou de maillechort dans lesquelles sont découpés les platines, les ponts et les roues, sont obtenues par laminage; il en est de même des plaques d'acier d'où l'on tire certaines pièces des mécanismes de remontoir, les plaques de contre-pivots, les ponts en acier etc. Les tringles rondes d'acier ou de laiton qui fournissent les pignons, les arbres, les vis sont obtenues par tréfilage.

L'élasticité

L'élasticité est la propriété d'un corps d'opposer une résistance à la déformation et de reprendre sa forme primitive aussitôt que la cause perturbatrice cesse.

Supposons une barre A fixée en R dans un mur; suspendons-y un poids P à l'extrémité libre. Sous l'effet de la charge P cette barre va fléchir pour prendre la position C . Supprimons maintenant le poids P ; cette barre reprendra sous l'effet de son élasticité sa forme primitive.

La limite d'élasticité est l'effort maximum que cette barre peut supporter; lorsque cet effort est passé elle subit une déformation permanente c'est-à-dire qu'elle ne reprend plus sa forme primitive.



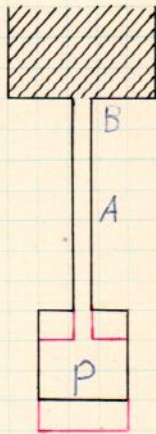
Cette force élastique (de flexion) est employée en horlogerie dans les ressorts de barillets, les ressorts de bascules, de cliquets et pour les spiraux.

L'élasticité des métaux diminue généralement avec l'augmentation de température; quand cette dernière s'élève les ressorts perdent de leur force élastique, il en est de même pour les spiraux et c'est la raison principale pour laquelle les spiraux non compensés provoquent du retard sur la marche des montres. Lorsque la température s'élève.

L'alliage nommé élinvar a une élasticité à peu près constante il est employé pour faire des spiraux qui donnent aux montres une marche indépendante de la température.

La résistance

Supposons une barre encastrée verticalement en B à laquelle nous suspendons un poids P. Sous l'effet de son élasticité cette barre va s'allonger.



Si l'on augmente encore le poids, la section de la barre va diminuer pour finalement se rompre.

La résistance est la propriété de s'opposer à cette rupture.

La dureté

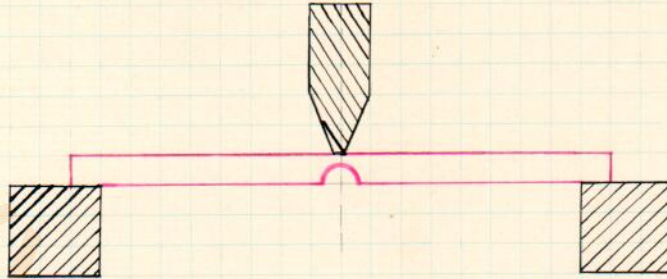
La dureté est la propriété d'un corps de résister à la déformation sous l'effet d'une pression.

Le diamant est le plus dur de tous les corps. On détermine la dureté par comparaison (échelle de Mohs) ou par différentes méthodes (Brinell - Shore) qui consistent à enfoncez une bille, un cône ou une pyramide dans le métal dont on veut mesurer la dureté, puis à mesurer l'empreinte obtenue: méthode Rockwell Wickers - Knopp L'appareil qui permet de mesurer la dureté est appelé duromètre

La résilience

La résilience est la propriété d'un corps de résister aux chocs.

Les essais de résilience se font au moyen d'un mouton qu'on laisse tomber un certain nombre de fois sur une éprouvette qui est une barre entaillée de la matière à éprouver jusqu'à ce que rupture s'ensuive.



La dilatation

La dilatation est le changement de volume d'un corps sous l'effet des changements de température.

En générale les corps se dilatent sous l'influence d'une augmentation de la température. La dilatation est la cause du retard des pendules lorsque la température s'élève; en effet lorsque la tige du pendule s'allonge celui-ci a des oscillations plus lentes. Pour atténuer ce défaut, on emploie des tiges de pendules en bois ou en invar, sinon il faut employer des pendules compensés.

Les métaux purs et les métaux ferreux

Les métaux purs

Les corps sont formés de particules appelées molécules. Ces molécules sont composées d'atomes; si les atomes sont identiques nous avons à faire à un corps simple; si les atomes sont différents le corps est un composé formé d'éléments.

Les métaux purs sont des corps simples par opposition aux alliages qui sont des mélanges de métaux purs. Ainsi l'or, l'argent, le fer pur, le nickel, le zinc, l'étain, le cuivre, le plomb sont des métaux purs. Tandis que le laiton, le maillechort, le bronze sont des alliages. Les métaux ferreux (fer, acier, fonte) ne sont pas des alliages. Ils sont constitués par du fer pur mélangé ou combiné avec d'autres corps notamment le carbone.

Métaux purs

Le cuivre est un métal rouge de densité 8,9; il est mou mais assez résistant. Comme il est très malléable et ductile en même temps qu'excellent conducteur de la chaleur et de l'électricité; on l'emploie à l'état pur pour faire des fils électrique et des ustensiles de cuisine destinés à la cuisson. On l'emploie en horlogerie dans la fabrication des cadrans (pièds) mais surtout il entre comme constituant dans plusieurs alliages, le laiton en particulier.

Le zinc est un métal blanc bleuâtre, peu résistant, de densité 7,1; il est très fusible, ne s'oxyde pas à l'air et à l'humidité, c'est pour quoi on l'utilise pour en recouvrir des objets de fer pour les protéger de la rouille (fer galvanisé). Il entre dans la composition de nombreux alliages le laiton en particulier.

Le nickel est un métal blanc brillant de densité 8,9; très dur et résistant, magnétique et inoxydable à la température ordinaire. A l'état pur on ne l'emploie pas en horlogerie mais il entre comme constituant dans plusieurs alliages (maillechort, acier-nickel.)

L'aluminium est un métal blanc de densité 2,8, est faible par rapport aux autres métaux. Mou à l'état pur, il peut être durci par l'adjonction d'autres métaux. Il est également bon conducteur de la chaleur et de l'électricité, c'est pour cette raison qu'il remplace parfois le cuivre surtout lorsque la question poids entre en ligne de compte. La surface des objets en aluminium peut être fortement durcie par oxydation chimique ou électrolytique. Cette couche peut être colorée à volonté (aluminium éteindé) cette propriété permet d'utiliser l'aluminium dans l'industrie horlogère pour la confection de socles de pendulettes, boîtes, cadrans, aiguilles.

Le glucinium est un métal gris-blanc très léger densité 1,85 très dur, il raye le verre, il est extrait d'une variété d'émeraudes appelée «beryl» c'est la raison pour laquelle on l'appelle aussi béryllium. Le glucinium est coûteux. On ne l'emploie pas à l'état pur; mélangé à faible quantité à certains métaux, (bronze en particulier) il leur donne des propriétés intéressantes entre autres celle d'être durcissable par traitements thermiques.

Les alliages au glucinium sont employés en horlogerie sous le nom de glucidur pour des pièces qui sans être en acier doivent avoir une certaine dureté. Ex. plé bouchons pour pivotements de mobiles, mobiles d'échappement dans les pièces non magnétique, petits ressorts etc.

Le bronze au glucinium est dur comme l'acier amagnétique et inoxydable. Il est employé pour la fabrication de balanciers monométallique. En raison du grain fin de cet alliage ces balanciers sont susceptibles d'un poli remarquables on les appelle balanciers glucidur.

L'or métal jaune très brillant de densité 19,32; fusible vers 1035°. C'est le plus malléable et le plus ductile de tous les métaux. L'or est inoxydable et inaltérable, cependant il se dissout dans un mélange d'acide azotique et d'acide chlorhydrique que l'on appelle eau régale. Il se dissout dans le cyanure de potassium et s'amalgame au mercure.

On le trouve à l'état pur sous forme de pépites dans certaines roches et dans les sables de certain fleuves; les pays producteurs d'or: l'Afrique (Transvaal) l'Amérique, Canada, Alaska, Mexique, Australie.

L'or pur est trop mou pour être utilisé seul il est allié à d'autres métaux en particulier au cuivre et à l'argent selon le résultat désiré dureté élasticité.

C'est la proportion d'argent ou de cuivre qui donne à l'or la couleur désirée, nous distinguons : l'or rouge, l'or rose, l'or jaune, l'or vert, l'or blanc.

La proportion d'or dans un alliage est indiquée par son titre, soit en millième soit en carat; le carat est le $\frac{1}{24}$ du poids de l'alliage, ainsi l'or à 78 carats est un alliage contenant 78 parties d'or pur sur 24 parties d'alliage. L'or est employée pour les monnaies, les bijoux et en horlogerie, principalement pour les boîtes.

L'Argent métal blanc très brillant densité 10,53; très malléable. Il résiste à l'oxydation de l'air, c'est un excellent conducteur de la chaleur et de l'électricité. L'argent pur est trop mou pour être utilisé seul, on lui ajoute du cuivre, le rapport entre le poids de l'alliage et celui de l'argent s'appelle le titre. En Suisse les titres usuels sont: 0,835 pour les pièces de monnaies, 0,800 et 0,925 pour les autres objets.

On utilise l'argent pour la confection de contact électrique vu sa résistance à l'oxydation et à sa grande conductibilité électrique. On l'utilise également pour recouvrir d'une mince pellicule des objets d'autres métaux par procédé galvanique ou par plaquage, l'argenture des mouvements de montres qui autrefois était courant est presque complètement abandonné du fait du noircissement de l'argent au contact ou sous l'influence de certaines combinaisons chimiques. (soufre)

Certaines boîtes de montres sont faites en maillechort recouvert de chrome
L'horloger emploie le maillechort pour faire une quantité d'outils

Le bronze d'étain est un alliage de cuivre et d'étain qui n'est pas employé en horlogerie. On en fait des monnaies, des médailles, pièces coulées pour machines, cloches, œuvres d'art.

Le bronze au glucinium appelé en horlogerie glucidur est un alliage de cuivre, zinc et de 1 à 2,5 % seulement de glucinium. Il a une excellente résistance à l'usure comme aussi une bonne élasticité. Par traitement thermique on peut lui donner la dureté de l'acier trempé et revenu. Grâce à ces propriétés on en fait des « bouchons » de pivotement en particulier pour les organes des montres à remontage automatique pour éviter d'augmenter le nombre de rubis et des ressorts de mécanisme. On en fait des balanciers monométallique pour les pièces soignées en raison de sa belle teinte or et du beau poli qu'il permet d'obtenir.

Alliage de nickel

Un grand nombre d'entre eux intéressant l'horlogerie sont des ferro-nickel. On en fait des spiraux dit "auto-compensateur". Grâce au ferro-nickel auquel on a ajouté d'autres constituants (manganèse, chrome, tungstène, silicium, glucinium ect) on obtient des spiraux dont l'élasticité est presque indépendante de la température. En outre ces spiraux sont inoxydables et très peu influencés par les champs magnétiques; sont Nivarox, Isoval, Mételinvar.

Les métaux ferreux

Les métaux ferreux; fer, acier, fonte ne sont pas des alliages, mais ils sont constitués par du fer pur mélangé ou combiné avec d'autres corps notamment le carbone

Les minerais de fer: le fer se trouve dans la nature à l'état oxyde (combinaison de fer, d'oxygène de carbonate, fer + carbone + oxygène et de sulfure) ces composés sont rarement purs. Ils sont généralement mélangés à des natures étrangères qui varient avec la nature du terrain et qui constitue la gangue du minerai.

La magnétite (aimant naturel) très riche en fer 45 à 70%. on en trouve en Suède en Norvège et dans l'Oural.

L'hématite rouge riche en fer on en trouve dans la Rhur en Westphalie

L'hématite brune qui est un oxyde contenant en outre de l'hydrogène et du phosphore. On en trouve en Allemagne, France (Lorraine) et en Angleterre. C'est ce minerai que l'on exploite à Délimont

Le fer sphatique qui est un carbonate de fer.

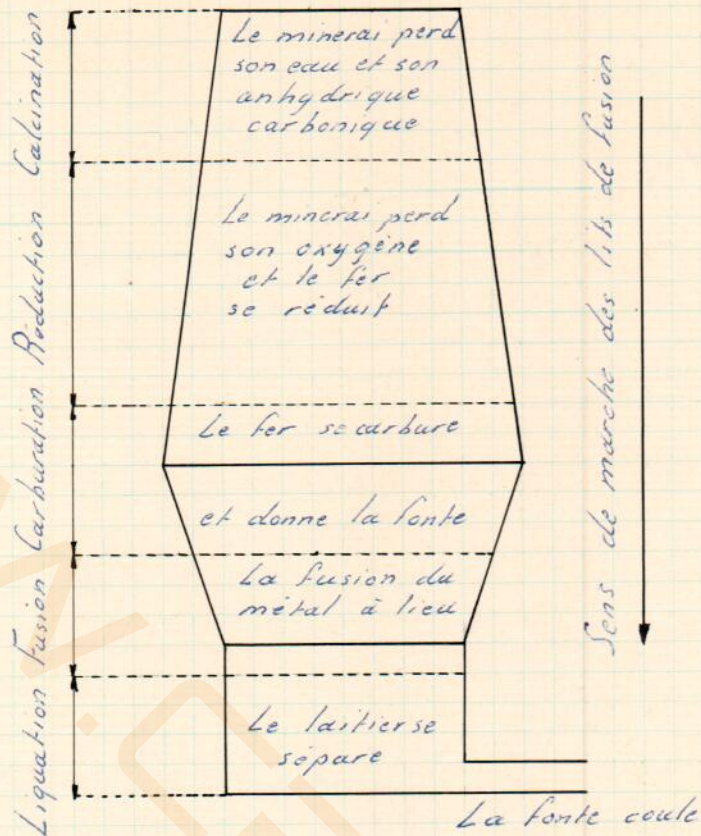
La pyrite martiale qui est un sulfure de fer peu utilisé en raison des difficultés d'éliminer le soufre.

Préparation du minerai

Le minerai est tout d'abord trié, concassé, lavé puis grillé avant d'être introduit dans le haut-fourneau

Le haut-fourneau comporte une grande cavité ayant la forme de deux troncs de cônes; l'ouverture supérieure s'appelle le gueulard le cône supérieure la cuve, la partie la plus large le ventre, le cône inférieure l'étagage, ce cône est prolongé par une cavité appelée l'ouvrage dans laquelle arrive les tuyères pour l'amenée de l'air et l'élimination du laitier. Au bas de l'ouvrage se trouve le creuset avec le trou de coulée qui peut être obturé.

La réduction du minerai



Le minerai est traité dans le haut-fourneau par le coke et la castine ou fondant et subit les transformations portées au schéma ci-dessus. Le coke sert à fournir la haute température nécessaire à la fusion, à débarrasser le minerai de son oxygène et ainsi à libérer le fer. Comme le coke est toujours en excès une partie se mélange au fer et donne la fonte.

Le fondant est généralement du calcaire qui se mélange avec la gangue et est recueilli à l'état liquide sous le nom de laitier.

Propriétés des métaux ferreux

C'est la teneur en carbone qui distingue le fer : l'acier et la fonte. Le fer contient de 0, à 0,05 % de carbone, l'acier de 0, à 2 % et la fonte plus de 2%.

Les fontes on divise les fontes en trois catégories : les fontes grises, les fontes blanches et les fontes traitées (spéciales).

La fonte grise est une fonte de moulage qui contient du silicium et plus de 3,5 % de carbone. Elle résiste mal à la traction et au choc mais bien à la compression. On l'utilise pour faire des bâtis de machines, socles, gros tuyaux, etc. Sa cassure est grise et à gros grain et fond vers 1200°.

La fonte blanche contient 2,5 à 3,5% de carbone dont la totalité est combiné au fer, ce qui donne «au fer» une cassure blanche. Cette fonte est dure et cassante et fond vers 1150°

Par affinage on la transforme en acier ou en fer

Les fontes spéciales sont préparées en vue de leur transformation en aciers spéciaux (au chrome, au manganèse au tungstène) On les obtient en mélangeant au minerai dans les proportions voulues. On obtient donc des fontes au manganèse, au chrome etc. Le silicium rend la fonte moulable tandis que le chrome la rend dure

Affinage de la fonte il se fait par différents procédés et après plusieurs fusions successives dans des fours spéciaux (Bessemer, Thomas Siemens-Martin) Le fer proprement dit est obtenu par puddlage ou par procédés électrolytique tandis que l'acier est obtenu par fusion

La trempe

L'acier dont la teneur en carbone dépasse 0,3% a la propriété de devenir dur et cassant; lorsque ayant été chauffé au rouge (700 à 800°) on le refroidit brusquement. Cette opération s'appelle la trempe.

Le fer ne peut pas être trempé sa teneur en carbone étant inférieure à 0,3%. En chauffant l'acier à la température de trempe on

modifie sa structure en le refroidissant brusquement sa structure reste modifiée et les propriétés de l'acier trempé sont différentes de celui qui ne l'est pas. La température de trempe est importante, l'acier insuffisamment chauffé ne se trempe pas tandis que l'acier surchauffé se décarbure et ne se trempe pas non plus on dit qu'il est brûlé

Le refroidissement se fait généralement dans un liquide, la température de trempe de l'acier pour outils (teneur en carbone variant de 1 à 2%) est d'environ 750 à 900° ce qui correspond à une couleur rouge cerise à orange.

L'acier trempé est dur et cassant; donc très fragile on diminuera sa fragilité par le revenu.

Différents genres de trempe

Trempe au pétrole: est surtout employée pour les aciers rapides, elle donne à ces aciers la plus grande dureté.

La trempe à l'huile est la plus lente et la moins dur on évite ainsi la déformation et l'éclatement. L'huile recommandée est l'huile de colza.

La trempe au suif est une trempe douce qui s'obtient dans du suif fondu elle convient pour certains outils tel que couteaux, lames de scies ou des pièces très minces

La trempe à l'air est la trempe la plus douce; elle consiste à refroidir les pièces dans un courant d'air comprimé

La trempe entre plaques froides les pièces très minces peuvent être trempées en les refroidissant entre deux plaques de fonte enduite d'huile. De cette façon les pièces restent planes.

La trempe aux bains chauds certains aciers deviennent très durs tout en gardant une grande résistance aux chocs en les trempant dans un liquide tiède ou même chaud jusqu'à une température de 200°

Les températures de trempe doivent pouvoir être contrôlées exactement ce qui se fait au moyen d'un pyromètre.

Le revenu

Les pièces en acier trempé sont dures et fragiles leur résilience est faible

On peut diminuer leur fragilité par le revenu, ainsi que leur dureté.

Cette opération consiste à chauffer l'acier trempé à une température qui lui donnera les propriétés désirées. L'acier blanchi est chauffé se couvre d'une couche d'oxyde de fer dont la teinte varie avec la température

On peut revenir une pièce à une température déterminée, d'après la couleur du revenu.

Couleurs de revenu

aucune couleur jusqu'à	200°
jaune très clair	210°
jaune clair (jaune paille)	220°
jaune	230°
jaune foncé	240°
jaune brun	250°
brun rouge	260°
rouge (pourpre)	270°
violet	280°
bleu foncé	290°
bleu (bleu bleuet)	300°
bleu clair	310°
gris bleu	320°
gris (gris vert)	330°

L'évaluation de la température du revenu par la couleur présente des inconvénients; elle est peu précise, ne garantit pas l'uniformité et oblige souvent de repolir les pièces. Il est donc préférable de mettre les pièces à revenir dans un bain d'huile dont on peut mesurer exactement la température et les y laisser le temps nécessaire pour que le revenu atteigne le cœur de la pièce.

Le recuit consiste à chauffer l'acier lentement à la température de trempe puis à le refroidir lentement aussi. Le recuit détruit les modifications, les propriétés engendrées par la trempe et le revenu. On recuit des pièces d'acier que l'on veut ramener à leur état primitif; on recuit également des métaux qui sont devenus cassants (écrouis) par le laminage ou le treffilage; on recuit également certaines pièces après usinage pour éliminer des tensions internes.

Pour recuire de grosses pièces, il faut qu'elles soient maintenues pendant un certain temps à une température élevée. Le risque de décarburation est grand aussi; il est avantageux de les placer dans des boîtes métalliques remplies de poussière de charbon, empêchant l'écoulement de l'air sur le métal, puis de chauffer ces boîtes au four pour les laisser ensuite refroidir lentement.

La cémentation

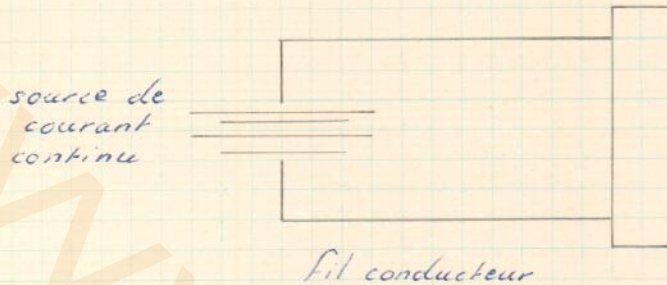
La trempe rend l'acier dur et fragile. On atténue la fragilité par le revenu, mais en même temps on diminue la dureté. Dans certains cas on cherche à obtenir des pièces dures capables de résister aux chocs et à l'usure.

La cémentation permet d'obtenir ce résultat. Elle est basée sur la propriété du fer de dissoudre le carbone lorsqu'il est à une température d'environ 900° . Si l'on met du fer chauffé à 900° en contact avec du carbone, il se produit une dissolution de ce dernier par les couches superficielles du fer. Celles-ci se transforment en acier; à la trempe elles deviendront dures, tandis que l'intérieur de la pièce constitué par du fer pur ne se trempe pas.

La cémentation est donc un traitement chimique doublé d'un traitement thermique. Pour cimenter une pièce on la chauffe en présence d'un corps à forte proportion de carbone et capable d'en abandonner une partie. Ce corps appelé cément sera suivant le cas: du charbon de bois, des déchets de cuir, d'os ou de cornes ou un mélange de charbon de bois et de carbonnade de barqum.

L'aimantation en faisant passer un courant électrique dans un fil enroulé autour d'une barre de fer, celle-ci devient aimantée et acquiert la propriété d'attirer la limaille de fer. Ce dispositif est un électro-aimant.

Electro-aimant



Si l'on interrompt le courant l'aimantation cesse.

En remplaçant la barre de fer par une barre d'acier, le même effet se produit, mais l'aimantation persiste lorsque l'on interrompt le courant; nous avons alors un aimant permanent.

Lorsqu'une montre se trouve dans le voisinage d'un appareil électrique (principalement un appareil dans lequel il y a une forte aimantation) certaines parties de celles-ci peuvent s'aimanter, ce qui va créer de graves perturbations dans la marche de la montre, voir même l'arrêter complètement, dans ce cas on lui restituera sa marche en la mettant sous l'influence d'un appareil à désaimanter. Celui-ci est un électro-aimant à courant alternatif qui lorsqu'il est sous tension crée un champ magnétique variant avec la fréquence du courant.

Une pièce aimantée placée dans ce champ doit modifier son aimantation chaque fois que le courant change de sens (généralement 60 fois à la seconde) si on éloigne cette pièce du champ magnétique très lentement, elle perd peu à peu son aimantation. Pour voir si une pièce est aimantée on peut la mettre en contact avec de la limaille de fer; si celle-ci s'attache à la pièce (nettoyée) elle est aimantée. On peut détecter l'aimantation au moyen d'une boussole: une pièce aimantée attire l'une des pointes de l'aiguille et repousse l'autre; si la pièce n'est pas aimantée elle attire les deux pointes de l'aiguille. Les «aimants» inconvenients résultants de l'aimantation ont amené l'horloger à construire des montres dites anti-magnétiques dans lesquelles si l'on n'a pas pu éliminer complètement les pièces en aciers trempés; on a fabriqué les pièces les plus délicates à l'aimantation (spiral, balancier, roue d'échappement etc)

en alliage non magnétique. L'horloger doit contrôler de temps à autres ses outils en acier trempé afin de contrôler s'il sont aimantés et le cas échéant les passer à l'appareil à désaimanter.

La rouille

Le fer et l'acier sont attaqués par l'air chargé d'humidité; l'attaque peut être lente au début, mais lorsque la rouille a commencé l'altération se fait rapidement.

Les causes de rouille sont: l'air humide ou vicié (gaz carbonique) les vapeurs acides, le chlore. La rouille est un grand ennemi de l'horloger. Pour la combattre il faut éliminer ce qui peut la provoquer. Contact des doigts, la bouche prête son travail à cause de l'halène, les brûleurs à gaz les émanations d'acide; la benzine de mauvaise qualité; il est interdit de manger des fruits dans un atelier d'horlogerie et il faut veiller à garder les fenêtres fermées les jours de brouillard.

On a cherché à protéger le fer et l'acier contre la rouille en revêtant les pièces d'un enduit protecteur, vernis émaille ou en les recouvrant d'une couche de métal résistant à la rouille: nickel, chrome. Les pièces du mécanisme d'une montre sont plongés dans un bain dit "anti-rouille" qui sans en changer beaucoup l'aspect, les protège d'une façon assez efficace. Ce procédé ne convient pas pour les pignons à cause du frottement des engrenages et dans les axes de balancier le polissage des pivots se fait après le passage dans le bain.

On peut protéger momentanément le métal (par exemple les outils) dans en les graissant légèrement mais les moyens les plus sûrs sont de combattre les agents producteurs de rouille.

Il existe un acier spécial appelé acier inoxydable dans lequel on a ajouté du chrome en particulier. Ces aciers ne sont pas utilisables pour les pièces de la montre car ~~elle~~ ils ne sont pas trempables et ne se travaillent pas bien. On les emploie spécialement pour faire des boîtes de montres assez soignées.

Les pierres d'horlogerie

Les mobiles d'une montre sont portés par des arbres d'acier trempé dont les extrémités appelées pivots sont polies et tournent dans des coussinets de pierre précieuse afin de réduire le frottement et par là l'usure et la perte de rendement. On a longtemps employés des pierres naturelles, mais aujourd'hui on fabrique des pierres synthétiques qui en possèdent les qualités, elles sont mêmes plus dures, se polissent mieux, sont plus faciles à travailler et surtout sont beaucoup moins chères.

Les Corindons

Le corindon naturel est le corps le plus dur après le diamant; c'est un oxyde d'aluminium cristallisé, il forme une série de pierres précieuses qui diffèrent entre elles par leur couleur.

rubis rouge

topaze jaune

saphir blanc incolore

saphir bleu bleu

émeraude vert

améthiste violet

Le corindon artificiel est obtenu par la calcination de l'alun-amoniacal auquel on a ajouté une matière colorante. On obtient ainsi des pierres qui ont les mêmes propriétés que les pierres naturelles. En outre elles sont plus homogènes, donc plus faciles à travailler, de dureté légèrement supérieur et surtout beaucoup moins chères. En horlogerie on emploie surtout le rubis en raison de sa belle teinte rouge favorable à la présentation du mouvement, mais le saphir moins employé lui est égal en qualité.

Le corindon naturel non cristallisé est mélangé à de l'oxyde de fer bien connu sous le nom d'éméri.

Les silicates

En horlogerie on emploie aussi des pierres à base de silice. Elles sont moins dures et plus cassantes que le corindon. Elles ne conviennent pas pour la fabrication des pierres chassées vu leur faible résistance. Dans les montres courantes on les emploie pour les levées, chevilles de plateaux et pierres de contre-pivots.

Le grenat

Le grenat est une pierre rouge foncé ou violassé

La vermeille

La vermeille est plus dure que le grenat, de couleur semblable, mais peu employée à cause de son apparence terne.

Les spinelles

Les spinelles sont de l'aluminiate de magnésium cristallisé. Elles ont les mêmes apparences que les corindons mais sont beaucoup moins dures. On les emploie surtout pour les contre-pivots, les levées et les chevilles de plateaux (ellipses)

Le diamant

Le diamant est le plus dur de tous les corps il le raye tous et n'est rayé par aucun. On ne peut le travailler qu'avec sa propre poudre. Le diamant est du carbone pur cristallisé; il est incolore et considéré comme la première des pierres précieuses; il n'a pas encore été possible de fabriquer des diamants synthétiques. Il est employé qu'exceptionnellement en horlogerie (chronomètre de marine) dans les mouvements. Par contre il sert à la décoration des boîtes et bracelets des montres bijoux.

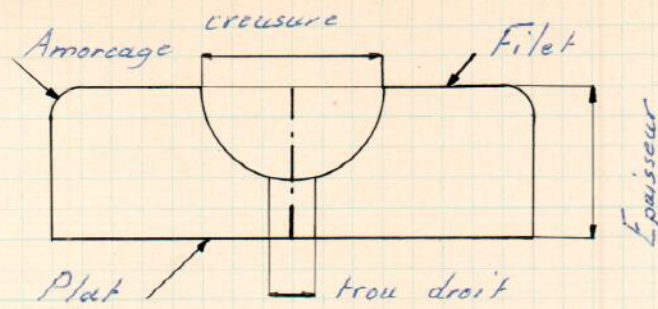
Les pierres d'horlogerie ne sont plus fixées aux mouvements par sertissage ce procédé ayant été remplacé par le moyen beaucoup plus pratique des pierres chassées; les pierres sont simplement enfoncées dans des trous rectifiés à l'étampe dont le diamètre est 1 centième plus petit que celui de la pierre. Ce procédé exige une grande précision dans le diamètre des pierres et des trous, mais il offre de sérieux avantages dont les principaux sont: simplicité de mise en place, faciliter de régler les ébats des mobiles (par le déplacement des pierres) précision dans l'emplacement des mobiles (rectification à l'étampe) élimination des pierres de mauvaise qualité celles-ci ne supportant pas le chassage.

Les pierres utilisées dans les mouvements d'horlogerie portent des noms différents suivant leurs formes; nous distinguons:

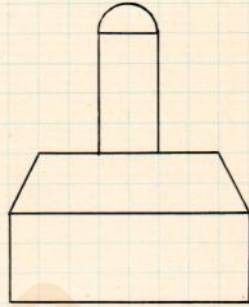
La pierre glace à trou droit ou parfois olivé

Cette pierre s'emploie généralement pour les platines et sert toujours de pivotement à un pivot cylindrique à portée.

La pierre glace



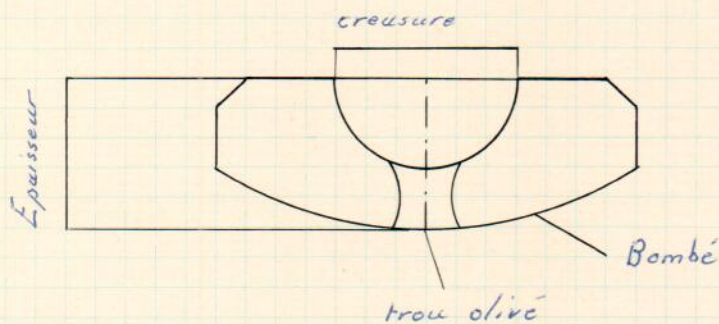
Pivot à portée cylindrique



La pierre demi-glace présente les mêmes caractéristique que la pierre glace et à le même emploi. Elle est plus élégante, en particulier par un amorçage plus grand et s'emploie généralement pour le chassage des ponts à cause de sa présentation.

La pierre de balancier s'emploie comme pivotement pour les pivots de balancier (pivot à cône). La pierre de balancier est toujours accompagnée d'une pierre de contre-pivot qui sert à limiter le jeu axial (ébat d'hauteur) du mobile. Le bout du pivot arrondi et poli s'appuie donc contre le plat du contre-pivot.

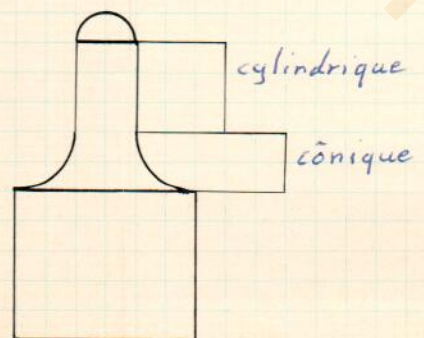
Pierre de balancier



Pierre de contre-pivot



Pivot



Répartition des pierres dans un mouvement d'horlogerie

Montre 75 rubis

Balancier	2 pierres bombées olivées	2
	2 pierres contre-pivots	2
	1 pierre éclipse	1
Ancre	2 pierres glace	2
	2 pierres levées	2
Roue d'ancre	1 pierre glace	1
	1 pierre demi-glace	1
Roue de seconde	1 pierre glace	1
	1 pierre demi-glace	1
Roue de moyenne	1 pierre glace	1
	1 pierre demi-glace	<u>1</u>
	Total	15 rubis

Montre 76 rubis

Même composition que le mouvement de 75 rubis	15
Roue de centre	
	1 pierre demi-glace (pont) <u>1</u>
	ou 16 rubis
Roue d'ancre	
	1 pierre-contre-pivot (d) 1

Montre 77 rubis

Même composition que le mouvement de 75 rubis	15
Roue d'ancre	
	1 pierre contre-pivot (dessus) 1
Roue de centre	1 pierre demi-glace <u>1</u>
	77 rubis

Signalons que pour un pivotement (à pivots conique)
il est indispensable d'avoir une pierre bombée à trou droit ou olivé,
ceci pour garantir le maintien de l'huile au point de pivotement
c'est-à-dire au centre

Les lubrifiants

Le frottement de deux corps qui glissent l'un sur l'autre absorbe de la force et produit de l'usure. On l'atténue en employant des matières dures et en polissant les surfaces frottantes. Malgré ses précautions il se produit au bout d'un certain temps un grippement. On évite le grippement en mettant un corps gras plus ou moins liquide sur les surfaces frottantes (graisse ou huile)

Les huiles

Les huiles peuvent être classées en quatre groupes :

Les huiles minérales : sont extraites du pétrole brut par distillation. On recueille ainsi successivement et séparément les composants qui sont à l'état de vapeur entre 50° et 80° puis entre 80° et 120° ensuite de 120° à 150° et enfin au-dessus de 150° centigrade. On obtient ainsi différents produits industriels : éther de pétrole, gazoline, essence de pétrole, huiles lourdes, huiles minérales, graisse, paraffine, goudron

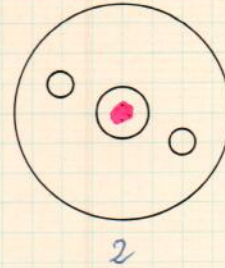
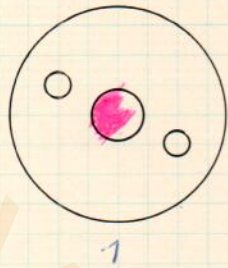
Les huiles végétales sont fournies par des semences de certains végétaux, colza, arachides, amandes, ricin, lin, etc ou par la pulpe de certains fruits (olives). Elles sont de bons lubrifiants mais elles s'oxydent rapidement en devenant rance et acide. C'est la raison pour laquelle on ne l'emploie pas pour huiler les mobiles d'une montre.

Les huiles animales : sont extraites des os et de différents organes des animaux. Les plus connues sont : l'huile de pieds de bœuf, de poisson, de baleine etc. Ces huiles s'oxydent aussi rapidement comme les huiles végétales, mais elles sont d'excellents lubrifiants ; elles sont aussi appelées huiles grasses.

Les huiles synthétiques ou artificielles sont fabriquées à partir d'éléments chimiques. Leurs propriétés ressemblent à celles des huiles minérales mais s'étalent beaucoup moins.

Les huiles d'horlogerie : celles-ci doivent satisfaire à des exigences très sévères elles ne doivent ni s'étaler, ni se dessécher, ni se coaguler, (gommage) ni oxyder les métaux avec lesquels elles sont en contact. Les pivots d'une montre ne peuvent être lubrifiés que par une faible quantité d'huile or, cette lubrification doit être assurée pour plusieurs mois, même pour plusieurs années. Les problèmes des huiles d'horlogerie ne sont pas encore complètement résolus, mais nous avons à disposition d'excellentes huiles qui doivent être employées selon leurs propriétés. Citons les plus connues L'huile Moebius fabriquée à Bâle qui est de couleur blanche-jaunâtre, qui est un mélange d'huile animale et végétale. C'est donc une huile grasse caractérisée par un faible étallement mais qui a tendance au mmmmm

L'huile Chronax : de fabrication française bien connue par sa belle couleur rouge rubis. C'est une huile minérale donc moins grasse que la précédente et qui présente surtout le gros défaut de s'étaler. Sa couleur rouge provient "d'anti-oxydants" qui lui sont ajoutés. On prévient dans une certaine mesure l'étalement de l'huile en recouvrant les surfaces à lubrifier d'un produit neutralisateur d'huile. (épilame-arétol)



- 1 Coqueret sur lequel on a déposé une goutte d'huile; celle-ci s'est étalée
- 2 Le même coqueret a été plongé dans un bain d'épilame avant le huilage; l'huile reste en goutte là où elle a été déposée.

L'huile Cuypers : de fabrication allemande (Dresde) possède à peu près les qualités de l'huile Moebius mais est incolore

L'huile Synt-A-Lube : est une huile synthétique incolore.

Toutes ces huiles sont vendues avec des degrés de viscosités différents afin d'être mieux adaptées aux mobiles à lubrifier. En effet un mobile qui tourne lentement et qui est soumis à une force assez grande (barillet, roue de centre) il faudra une huile visqueuse. Par contre dans une montre les pivots de l'échappement (en particulier du balancier) tournent à grande vitesse sous l'action d'une faible force; ces pivots seront lubrifiés avec une huile fluide.

Les produits de nettoyage

Ces produits doivent avoir avant tout la propriété de dissoudre les corps gras. Ils sont généralement très volatils et dégagent des gaz, leur emploi n'est pas sans danger : explosions, intoxications. Les pièces qui ont été plongées dans un liquide de nettoyage puis exposées à l'air se refroidissent très rapidement par l'évaporation du liquide qui les recouvre. Il peut donc se former de la buée de condensation qui peut engendrer de la rouille sur les pièces d'acier.

Les principaux produits de nettoyage employés en horlogerie sont :

La benzine : qui est un sous-produit de la distillation du pétrole brut ou du goudron de houille, c'est un hydro-carbure. Elle est incolore très volatile et très inflammable

La garoline ou essence légère : qui est un sous-produit de la distillation du pétrole brut, plus volatile et plus inflammable encore que la benzine

La benzine et la garoline dissolvent bien la graisse mais pas l'eau, il ne faut donc pas les employer pour nettoyer des pièces humides. On trouve sur le marché des produits de nettoyage qui sont des composés chimiques qui possèdent les qualités de la benzine sans en avoir les inconvénients

Citons par exemple le produit F45

Le trichloréthylène : est un puissant dégraissant ininflammable. Cependant ces vapeurs sont nocives et les fabriques qui l'emploient doivent avoir une installation de ventilation. D'autre part lorsque le bain devient vieux il dégage du chlore qui oxyde le métal.

L'alcool éthylique : est un liquide qui a sensiblement les mêmes propriétés que la benzine ; est obtenu par distillation de corps fermentés. Fruits etc

L'alcool méthylique : est obtenu par distillation du bois et est vénéneux.

L'alcool à brûler ou esprit-de-vin ne doit pas être employé pour le nettoyage des pièces d'horlogerie, on prendra de préférence de l'alcool rectifié

à 90° (90% d'alcool et 10% d'eau) ou de l'alcool pur. L'alcool pur a le pouvoir d'absorber une certaine quantité d'eau on l'emploiera donc pour le séchage des pièces humides. L'alcool dissout moins bien les corps gras que la benzine, mais il dissout la gomme-laque ; il faut donc éviter d'y plonger les ancras et les balanciers, pièces sur lesquelles les pierres sont fixées au moyen de gomme-laque (levées, élipses)

Éther et acétone : l'horloger emploie parfois ces deux produits ; le premier pour le nettoyage des pierres, le deuxième pour dissoudre le vernis zapon que

l'on met souvent comme protecteur des fonds de boîtes de montres en cours de fabrication.

Le bain de cyanure on nettoie et ravive les pièces en laiton ou en alliage de cuivre en les plongeant un instant dans une solution de cyanure de potassium et d'eau (60gr par litre). Le cyanure est un poison très violent. Les pièces à y plonger sont manipulées au moyen de brucelles ou de crochets et immédiatement rincées à l'eau courante ainsi que les outils en question. Pour les sécher il faut les passer à l'alcool.

On emploie de plus en plus en horlogerie des machines à nettoyer. Les pièces détachées sont introduites dans un panier cylindrique formé de différents treillis et compartimenté. Le panier tourne et passe successivement dans des récipients contenant différents bains. Le premier bain est généralement une lessive (éventuellement chaude) le deuxième de l'alcool pur, le troisième de la benzine; dans le quatrième les pièces sont séchées sous l'action d'un courant d'air chaud.

Mentionnons encore le dernier cri du nettoyage adapté aux pièces d'horlogerie: les ultra-sons; les pièces à nettoyer sont plongées dans un bain appelé solvant, traversé par des ondes super-soniques produites par un courant à hautes fréquences. Il s'en suit une vibration qui détache de façon absolue toutes les impuretés. Ce procédé demande encore certaine mise au point car les pièces ne peuvent pas être traitées en grande quantité à la fois et leur manipulation coûte chère.

Pour nettoyer à sec les surfaces polies l'horloger emploie le cabron de peau pour ne pas rayer les ponts dorés ou nikelés; il faut toujours frotter dans le sens des traits de l'adoucissage.

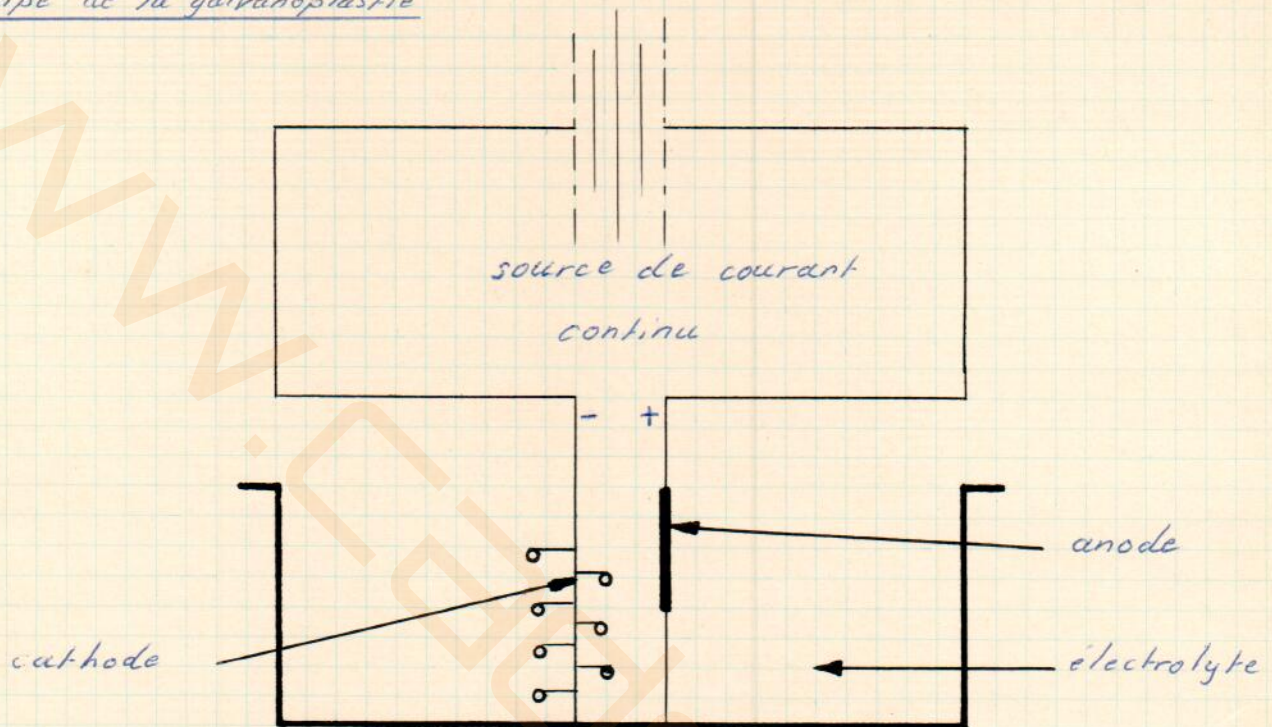
Pour nettoyer soigneusement les pierres (spécialement les trous) on se sert de cheville de bûis taillée en pointe. Cette opération s'appelle le chevillage et a pour but d'éliminer le voile invisible laissé sur les pierres par les bains de nettoyage.

Pour nettoyer le pivots on se sert de moelle de sureau qui doit être parfaitement sèche.

La protection des métaux

Les diverses pièces qui constituent le mouvement d'une montre sont protégées de l'oxydation par un revêtement d'une matière aussi inoxydabile que possible. Les ponts et les platines sont dorés, argentés, ou nichelés selon l'aspect désiré et les pièces d'acier sont recouvertes d'une couche dite "antirouille". Ces revêtements sont obtenus par le procédé de la galvanoplastie.

Principe de la galvanoplastie



Dans une cuve pleine d'une solution aqueuse d'un sel de métal. On introduit deux pièces métallique dont l'une appelée anode électrode positive est constituée du même métal que celui qui se trouve dans la solution; l'autre pièce appelée cathode électrode négative est une tringle munie de crochets sur lesquels seront accrochés les pièces à revêtir. Les électrodes sont reliés à une source de courant continu, celui-ci passera au travers du liquide (du positif au négatif) emportant avec lui des atomes du métal en suspension pour les fixer sur la cathode.

Le bain est l'électrolyte et s'il contient un sel d'or, d'argent ou de nickel, les pièces sortiront dorées, nichelées ou argentées. La durée du bain dépend de l'épaisseur de revêtement désirée, de l'acidité du bain et de l'intensité du courant.

Il est indispensable que les pièces à revêtir soient absolument dégraissées et propre sinon le métal de revêtement ne peut se fixer convenablement on dit qu'il pèle

Afin de donner un aspect soigné aux pièces d'horlogerie celles-ci sont décorées avant d'être passées au bain.

La décoration consiste à former des dessins sur les ponts après l'adoucissage à plat (vagues, côtes, perlage) les roues sont adoucies de façon circulaire et les biseaux des ponts et platines sont souvent lapidés ou tournés au burin diamant.

Le procédé galvanique est appliqué au revêtement des boîtes de montres dans ce cas l'épaisseur de la couche atteint en moyenne 0,02 mm (20 microns) et prend le nom de plaque galvanique.

Organe régulateur de la montre

Il se compose d'un balancier muni d'un spiral

Le balancier : est un volant en forme d'anneau circulaire relié à son centre par 2 ou 3 bras. Il est monométallique et sa serge peut-être garnie de vis ou bimétallique et sa serge coupée doit toujours être munie de vis. Le balancier bimétallique coupé est appelé balancier compensateur, les trous destinés à recevoir les vis sont en plus grand nombre que celles-ci afin de pouvoir régler la compensation (aux différentes températures) par leur déplacement.

Le spiral est une longue lame métallique élastique enroulée en spirale (quelquefois en hélice)

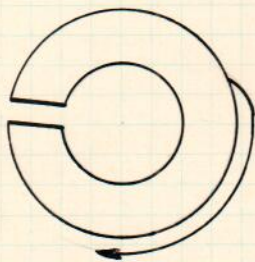
On distingue 3 genres de spiraux :

le spiral plat dont les spires sont équidistantes et sur un même plan

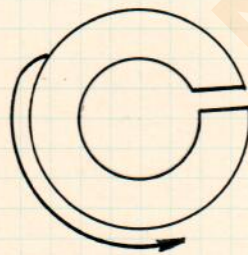
le spiral Breguet qui ressemble au spiral plat, mais dont la dernière spire est ramenée sur un plan supérieure et parallèle aux autres spires et forme une courbe particulière qui devra assurer un développement concentrique du spiral. Cette courbe s'appelle courbe Phillips

le spiral hélicoïdal n'est plus employé dans les montres parce qu'il nécessite trop de place.

Sens d'enroulement du spiral



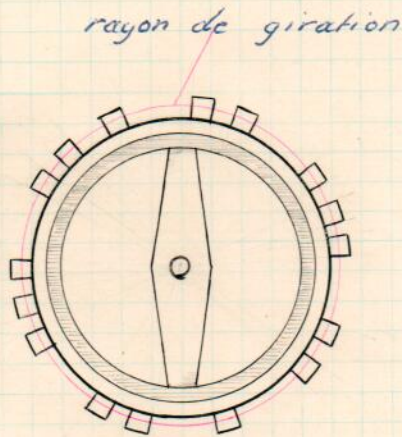
spiral à droite



spiral à gauche

Rayon de giration du balancier

Le rayon de giration d'un balancier est le rayon d'une verge fictive ou imaginaire sur laquelle on suppose être concentré tout le poids du balancier.



Problème n°1 page 36

$$M = \frac{E \cdot e^3 \cdot h}{12 \cdot L} = \frac{20000000 \cdot 0,000512 \cdot 0,22}{12 \cdot 265} = \underline{\underline{0,0708 \text{ gmm/s}}}$$

Problème n°2 page 36

$$M \pm 10\% = 0,7792$$

$$L = \frac{E \cdot e^3 \cdot h}{12 \cdot M} = \frac{20000000 \cdot 0,000512 \cdot 0,22}{12 \cdot 0,7792} = 247 \text{ mm}$$

Longueur 1 265

Longueur 2 247

Raccourcissement 24 mm

Problème n°3 page 37

$$J = \frac{P}{g} \cdot r^2 = \frac{0,42}{9808} \cdot 27,04 = \underline{\underline{0,0011358 \text{ gmm/s}}}$$

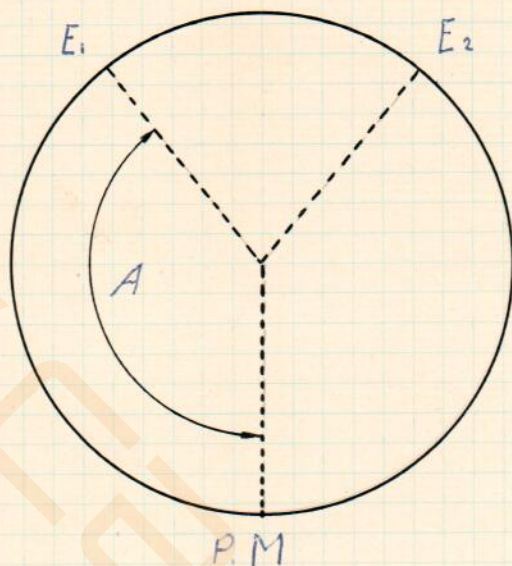
Problème n°4 page 37

$$r = \sqrt{\frac{0,0024 \cdot 9808}{0,47}} = \underline{\underline{7,68 \text{ mm}}}$$

L'isochronisme

C'est la propriété d'un balancier muni d'un spiral d'accomplir des oscillations ayant toujours la même durée quelle que soit l'amplitude.

Certains facteurs détruisent l'isochronisme ; une partie peuvent être éliminés, d'autres comme les frottements par exemple ne peuvent être qu'atténués.



$E_1 - E_2$ points extrêmes des oscillations
P.M point mort
angle A amplitude

La course du balancier de $E_1 - E_2$ s'appelle une alternance.

La course $E_1 - E_2$ et retour à E_1 est une oscillation.

En théorie l'amplitude est compté à partir du point mort mais en pratique elle sera toujours doublé. Exemple : On dira qu'un balancier à une amplitude de 7 tour ; ce qui correspond en théorie à une amplitude de 780°

Le temps mit par le balancier pour accomplir une oscillation (2 alternances) s'appelle la durée d'oscillation ou période, elle est de $\frac{2}{5}$ de seconde pour un balancier qui fait 78000 ah

Influence d'une force extérieure sur la durée d'oscillation

Si la force agit dans le sens de rotation du balancier c'est une impulsion; si la force agit en sens inverse c'est une résistance

Une impulsion avant le point mort diminue la durée d'oscillation provoquant ainsi de l'avance

Une résistance avant le point mort augmente la durée d'oscillation provoquant ainsi du retard

Une impulsion après le point mort augmente la durée d'oscillation provoquant ainsi du retard (le chemin parcouru par le balancier est plus long)

Une résistance après le point mort diminue la durée d'oscillation (le chemin parcouru par le balancier est plus court) produit de l'avance

Une perturbation causée par une force extérieure dépend de l'intensité et du temps pendant lesquels cette force agit. Deux forces de même intensité et de même durée n'ont pas le même effet sur des balanciers différents: plus le moment d'inertie d'un balancier et sa vitesse sont grands; moins il sera influencé par une force extérieure.

Règle: l'influence d'une force extérieure est d'autant plus grande qu'elle est intense et agit longtemps et que le moment d'inertie du balancier et sa vitesse au moment de la perturbation sont faibles

Équilibre du balancier

Le balancier d'une montre doit être équilibré, c'est-à-dire que son centre de gravité doit se trouver sur l'axe. Un balancier non équilibré crée un défaut d'isochronisme.

On appelle centre de gravité d'un corps un point sur lequel on peut supposer être concentré tout le poids de ce corps.

Un corps suspendu par son centre de gravité reste en équilibre dans n'importe quelle position.

Influence d'un défaut d'équilibre du balancier sur la durée d'oscillation

Nous considérons 2 cas : Premier cas.

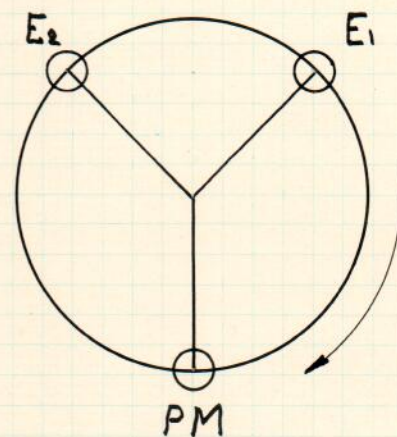
Lorsque le centre de gravité du balancier au repos se trouve en-dessous de l'axe.

L'amplitude est inférieure à $\frac{1}{2}$ tour.

E_1 -PM impulsion avant le PM = avance

PM- E_2 résistance après le PM = avance

Influence : avance



L'amplitude est supérieure à $\frac{1}{2}$ tour.

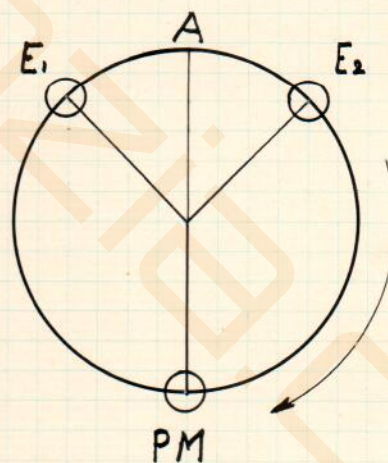
E_1 -A résistance avant le PM = retard

A-PM impulsion avant le PM = avance

PM-A résistance après le PM = avance

A- E_2 impulsion après le PM = retard.

Influence nulle



Règle

Lorsque le centre de gravité du balancier au repos se trouve en-dessous de l'axe, les oscillations sont d'autant plus rapides que l'amplitude est petite.

Lorsque l'amplitude atteint 220° la durée d'oscillation est la même que celle du balancier équilibré. Dans une amplitude supérieure à 220° il y aurait du retard.

Influence d'un défaut d'équilibre du balancier sur la durée d'oscillation

Deuxième cas

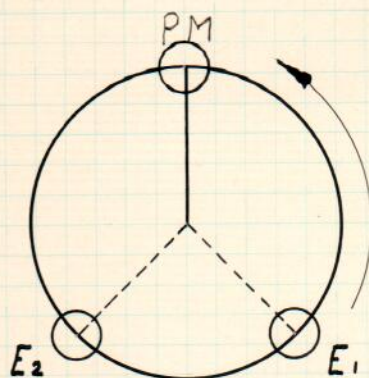
Lorsque le centre de gravité du balancier au repos se trouve au-dessus de l'axe

L'amplitude est inférieure à $\frac{1}{2}$ tour

E_1 - PM résistance avant le PM : retard

PM - E_2 impulsion après le PM : retard

Influence retard



L'amplitude est supérieure à $\frac{1}{2}$ tour

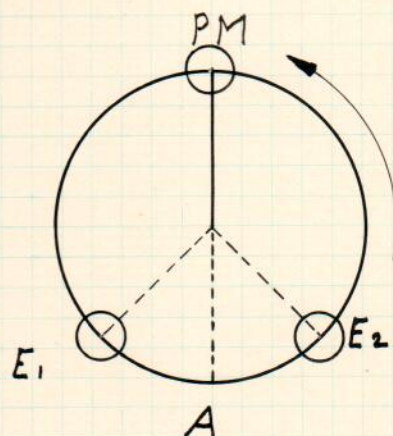
E_1 - A impulsion avant le PM : avance

A - PM résistance avant le PM : retard

PM - A impulsion après le PM : retard

A - E_2 résistance après le PM : avance

Influence nulle



Règle

Lorsque le centre de gravité d'un balancier au repos se trouve au-dessus de l'axe, les oscillations sont autant plus lentes que l'amplitude est petite

Lorsque l'amplitude atteint 220° la durée d'oscillation est la même que celle d'un balancier équilibré; dans une amplitude supérieure nous aurions de l'avance

Dans la position horizontale de la montre, le défaut d'équilibre du balancier ne tend ni à accélérer, ni à ralentir le mouvement du balancier, il n'a pas d'influence sur la durée d'oscillation.

Le spiral Breguet

Le centre de gravité d'un spiral bien centré se trouve sur l'axe. Pendant le mouvement du balancier le spiral se contracte et s'étend alternativement. Si c'est un spiral plat ses mouvements seront particulièrement marqués à l'opposé des goupilles et du pivot. Il en résultera un développement excentrique qui créera un défaut d'équilibre.

Ce défaut d'équilibre aura les mêmes conséquences qu'un défaut d'équilibre du balancier mais avec la différence qu'il variera constamment.

Il est donc nécessaire de trouver une solution pour assurer un développement concentrique du spiral.

On y parvient au moyen du spiral Breguet et dernièrement des chercheurs ont trouvé une solution assez satisfaisante par le spiral à cornières ou spiral Michel.

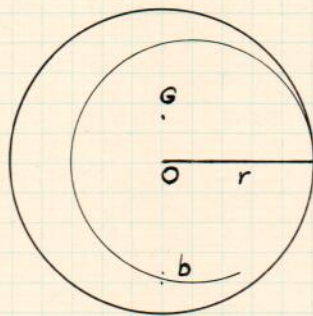
Le spiral Breguet est un spiral plat auquel on a relevé la dernière spire sur un plan supérieure et parallèle aux autres spires.

On donne à cette dernière spire une forme particulière qui doit assurer le développement concentrique du spiral. Elle prend le nom de courbe Phillips (nom de son inventeur) ou simplement courbe terminale.

La courbe Phillips doit remplir les conditions suivantes:

A Le centre de gravité de la courbe doit se trouver sur le rayon du spiral perpendiculaire à celui qui aboutit à la naissance de la courbe

B La distance de ce centre de gravité au centre du spiral doit être égale au carré du rayon du spiral divisé par la longueur de la courbe



La distance $O-G = \frac{R^2}{L}$ L étant la longueur de la courbe de sa naissance aux goupilles b.

Pour former une courbe Phillips on emploie un dessin contenu dans les tables de courbes terminales. Dans celles-ci les courbes portent un numéro qu'il s'agit de calculer par la formule suivante.

$$N = \frac{100 \cdot \alpha}{r}$$

dans laquelle α est la distance centre-goupilles
 r le rayon du spiral

Les tables portent les dessins de courbes dans les grandeurs naturelles correspondant aux spiraux employés couramment

De la formule précédente nous pouvons calculer.

$$\alpha = \frac{N \cdot r}{100}$$

$$r = \frac{100 \cdot \alpha}{N}$$

Problème

Calculer le numéro de la courbe d'un spiral Breguet étant donné: diamètre du spiral 7,5mm, distance centre du balancier goupilles 3mm

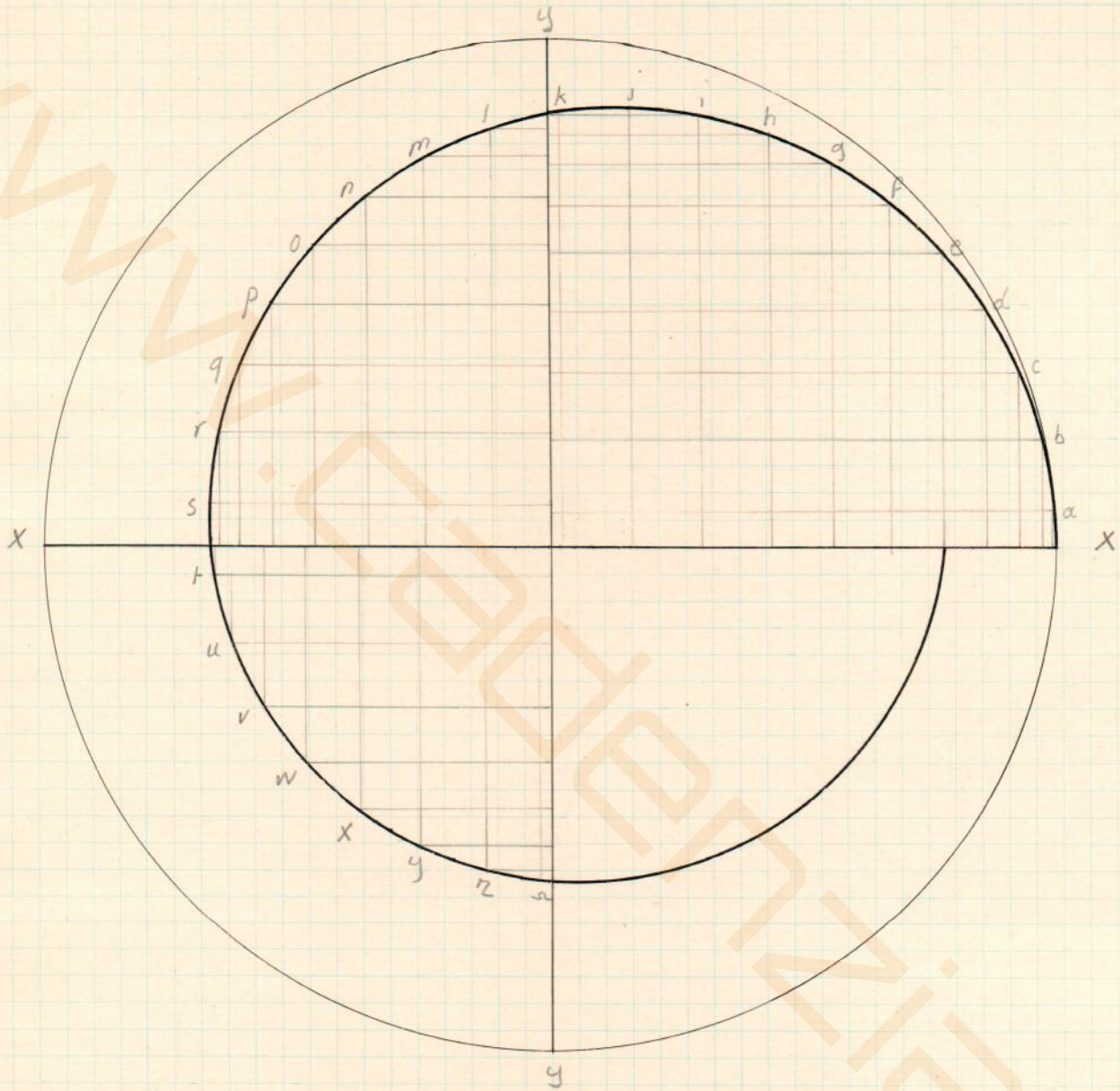
$$N = \frac{100 \alpha}{r} = \frac{100 \cdot 3}{7,5} = \underline{\underline{80}}$$

Courbe Breguet n° 65

Distance centre - goupilles $\alpha = \frac{N \cdot r}{100} = 48,75 \text{ mm}$

La différence entre les verticales haut et les verticales bas doit être égale à $\frac{r^2}{e}$ r étant le rayon du spiral e la longueur d'un élément

La différence est: $\frac{r^2}{e} = \frac{76 \cdot 76}{1} = 562,5$



Horizontale gauche

/	8
m	78
n	27
o	34,5
p	47
q	46
r	49,5
s	50
t	49
u	47
v	42
w	36
x	28
y	20
z	8
<hr/>	
	505-

Horizontale droite

a	74,5
b	73
c	69,5
d	64,5
e	58
f	50,5
g	42,5
h	32,5
i	22
j	12,5
k	7,5
<hr/>	
	507-

Verticale haut

a	5	q	25,5
b	15,5	r	76
c	25,5	s	6,5
d	36	<hr/>	
e	43	782	
f	50,5		
g	56		
h	60		
i	63,5		
j	64,5		
k	64		
l	67,5		
m	57		
n	57		
o	45		
p	36		

Verticale droite

f	5
u	15
v	24
w	32
x	38
y	44,5
z	47,5
a	56
<hr/>	
	222
	562,5
	<hr/>
	784,5

Les différences de 4 CADENZIA.CH PAGE 30/53 par les verticales sont négligeables

Le point d'attache

Nous avons vu que le centre de gravité d'un balancier doit se trouver exactement au centre de l'axe sinon le défaut d'équilibre qui en résulte crée des variations sur la marche de la montre. aux positions verticales, il en est de même du spiral.

Un spiral muni d'une courbe terminale se développe concentriquement si la courbe est juste son centre de gravité est sur l'axe.

Le spiral plat ne peut pas se développer concentriquement: il le fait à l'opposer des goupilles et du piton, son centre de gravité se déplace constamment. Nous pouvons représenter par une courbe le déplacement de ce centre de gravité

Spiral à droite

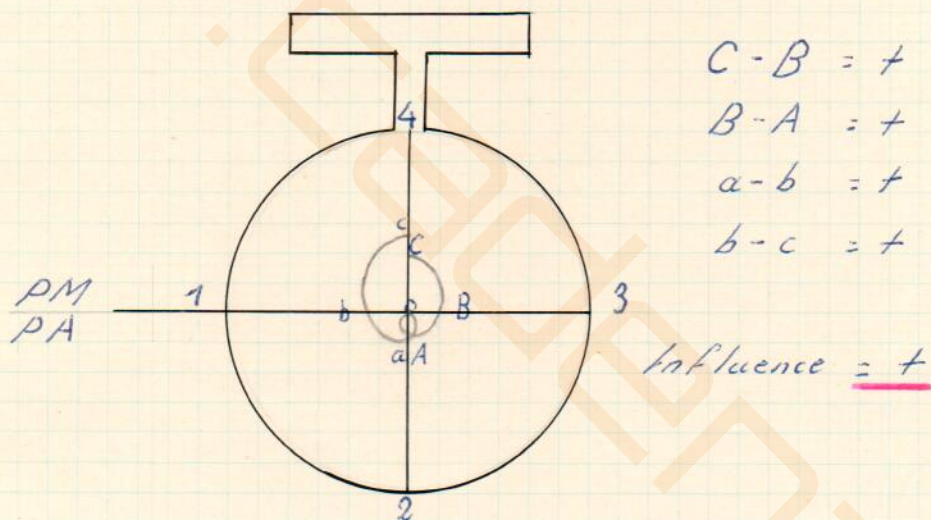
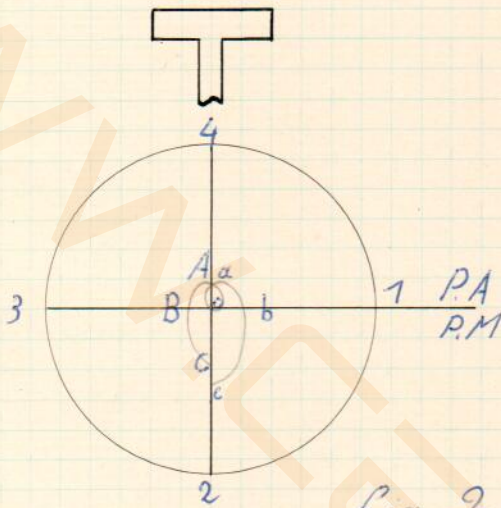


Fig 1

Prenons l'exemple d'un spiral à droite (fig 1). Au repos c'est-à-dire lorsque le balancier est au point mort son centre de gravité se trouve en O. Faisons tourner le balancier de $\frac{3}{4}$ de tour dans le sens opposé à l'enroulement du spiral, le spiral se contracte et son centre de gravité se déplace suivant la courbe O-A-B-C. Lâchons le balancier et étudions l'influence du déplacement du centre de gravité pour une alternance. De C-B le centre de gravité descend provoquant une impulsion avant le PM dont l'influence est de l'avance, de B-A c'est encore une impulsion avant le PM, donc aussi de l'avance; le petit déplacement de A-O et o-a est négligeable: l'alternance se poursuit, le spiral s'étend. De a-b nous avons une résistance après le PM qui donne de l'avance de b-c c'est encore une résistance après le PM qui donne aussi de l'avance.

Nous constatons donc que pour un point d'attache placé selon la Fig. 1 l'influence du déplacement du centre de gravité donne de l'avance. En admettant que dans cette montre la couronne se trouve en haut nous aurions de l'avance; dans la position pendant haut (V.H.) par rapport à la position horizontale (H.H.) dans laquelle le défaut d'équilibre n'a pas d'influence. Cette avance est désirable car elle compense le retard provoqué par l'échappement.

Spiral à droite



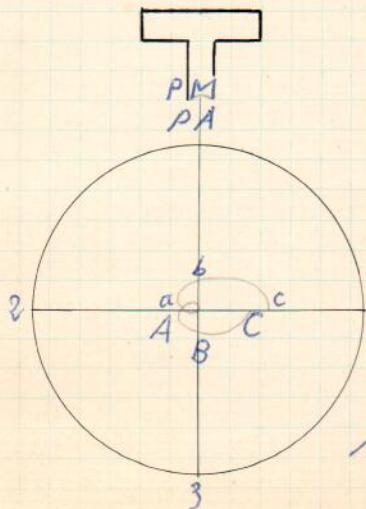
C-B = retard
 B-A = retard
 a-b = retard
 c-b = retard

Influence retard

Fig 2

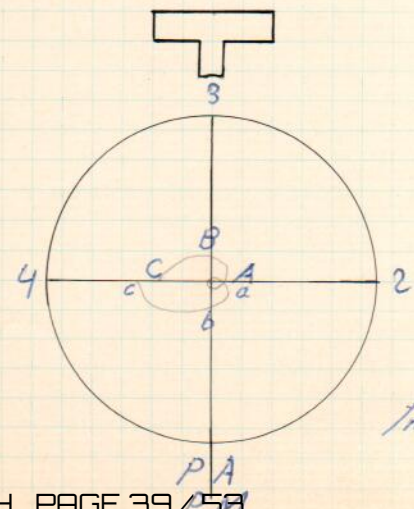
En répétant la même expérience, mais en reportant le point d'attache à l'opposé; c'est-à-dire à droite, nous constatons une influence contraire au 1^{er} cas. Selon la figure 2 nous aurons: C-B = retard; B-A = retard; a-b = retard; c-b = retard.

Si dans cette montre nous conservons la même position du mouvement, couronne en haut, nous aurions du retard par rapport à la position horizontale ce qui serait nuisible puisqu'il s'ajouterait à celui provoqué par l'échappement. En répétant la même expérience mais en reportant le point d'attache en haut puis en bas la montre étant toujours dans la même position nous obtiendrons les résultats suivants:



C-B = +
 B-A = -
 a-b = +
 b-c = -

Influence 0



C-B = -
 B-A = +
 a-b = -
 b-c = +

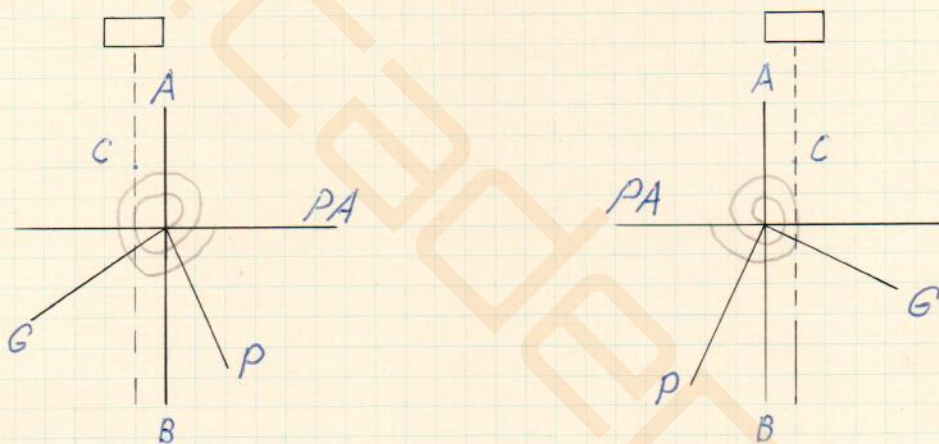
Influence 0

Des quatre expériences précédentes nous pouvons établir le tableau suivant.

Spiral à droite	
Position du P.A. vu côté mouvement	Influence
à gauche	avance
à droite	retard
en haut	négligeable
en bas	négligeable

Règles

- 1- avec un spiral s'enroulant à droite on placera le P.A. à gauche
- 2- avec un spiral s'enroulant à gauche on placera le P.A. à droite



La ligne verticale A-B passe par le centre de la pierre de cog elle est perpendiculaire à une ligne verticale passant par le centre C du mouvement et par la tige de remontoir. La ligne G donne la direction des goupilles de raquette et la ligne P celle du piton. Le P.A. doit se trouver sur l'horizontale passant par le centre de la pierre de cog de la façon suivante:

- à droite si c'est un spiral à gauche
- à gauche si c'est un spiral à droite

L'étude que nous venons de faire est basée sur une montre de poche qui dans les positions verticales s'observe toujours ainsi:

- V. H. verticale pendant en haut
- V. G. verticale pendant à gauche
- V. D. verticale pendant à droite

En plaçant le point d'attache de la façon que nous venons de voir nous obtenons les influences suivantes

V. H : avance

V. G : négligeable

V. D : négligeable

Le retard aurait donc lieu dans la position V. B (verticale pendant en bas) qui est inhabituelle et pas observée dans la montre de poche. Pour la montre bracelet on observe pas les mêmes positions; car la position V. H ne se réalise presque jamais, tandis que la position V. B est fréquente; il faut donc faire le dessin du point d'attache en mettant la couronne en bas et l'on obtient les résultats suivants:

V. B : avance

V. H : retard

V. G : négligeable

V. D : négligeable

Dans l'étude de l'influence du point d'attache sur l'isochronisme que nous venons de faire, nous avons tenu compte que de l'effet de gravité dont l'influence ne se fait sentir que dans les positions verticales de la montre. Or l'effet élastique d'un spiral qui se développe excentriquement a une influence sur l'isochronisme et sur les positions verticales par rapport aux positions horizontales. D'une étude présentée à la société suisse de chronométrie nous pouvons citer les règles et observations suivantes se rapportant surtout aux montres bracelet.

1 Pour obtenir de l'avance dans les petites amplitudes le point d'attache à la virole doit se trouver sur le même rayon que le point d'attache extérieure réel. Celui-ci ne se trouve ni aux goupilles ni au pignon mais entre les deux à une distance angulaire qui dépend de la distance goupilles, pignon, de l'écartement et de l'élasticité des goupilles. En général le point d'attache réel se trouve plus près des goupilles que du pignon.

2 L'influence du point d'attache est beaucoup plus grande dans les petits mouvements que dans les grands.

A plus le centre du spiral est grand plus le point d'attache a d'influence sur la marche de la montre

B plus le nombre de spire est petit plus la position du point d'attache a d'influence égale

Or dans les très petits mouvements le centre du spiral est proportionnellement plus grand et le nombre de spires plus petit

Il est donc recommandé d'employer des viroles aussi petites que possible et il vaut mieux avoir un point d'attache un peu court (avec un petit centre) qu'un point d'attache juste (avec un grand centre)

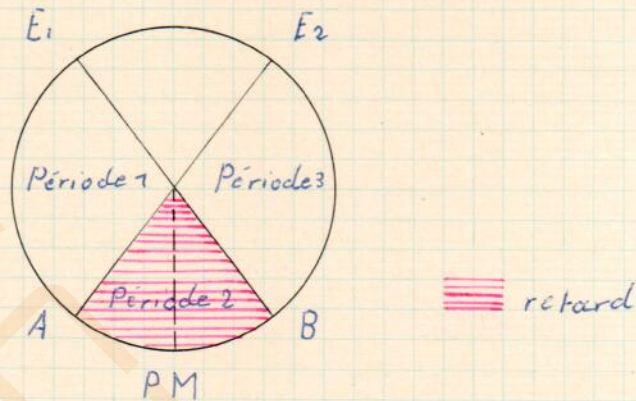
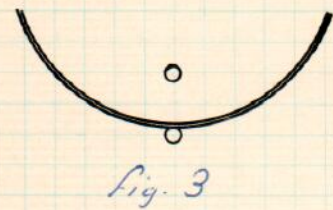
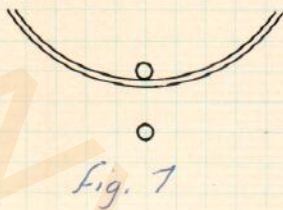
3 Contrairement à certains horlogers qui trouvent ridicule d'observer le point d'attache avec des spiraux qualité 5 il est recommandé de le faire même dans les montres de qualité courante en raison de ses multiples avantages sur le réglage

4 Pour obtenir un isochronisme aussi parfait que possible ainsi qu'un bon réglage dans les différentes positions de la montre, on doit déterminer pour chaque calibre la position du point d'attache la plus favorable

Influence du jeu du spiral entre les goupilles de raquette

Premier cas:

Au repos le spiral se trouve au milieu des goupilles



Décomposons l'alternance en trois parties:

1- La période $E_1 - A$ durant laquelle le spiral est appuyé contre la goupille intérieure Fig 1; la longueur active du spiral n'a pas d'influence sur la durée d'oscillation.

2 La période $A - B$ durant laquelle le spiral ne touche plus aux goupilles Fig 2; la longueur du spiral est donc augmenté j'usqu'au pignon ce qui crée du retard.

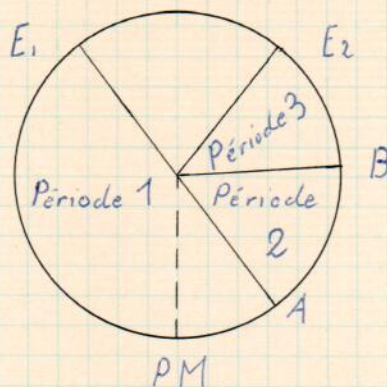
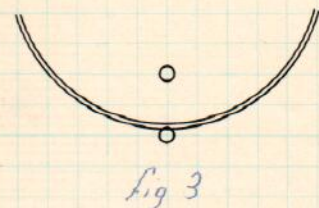
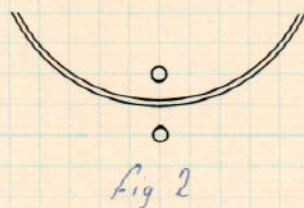
3 La période $B - E_2$ durant laquelle le spiral est appuyé contre la goupille extérieure Fig 3; la longueur du spiral est à nouveau virale-goupilles donc la durée d'oscillation est normale

Règle

Lorsque le spiral au repos n'est appuyé ni à l'une ni à l'autre des goupilles; il y a du retard dans la marche de la montre et ce retard est d'autant plus considérable que l'amplitude est petite

Deuxième cas

Au repos le spiral est appuyé contre une des goupilles



Dans ce cas trois parties sont également à considérer

1 La période E_1-A durant laquelle le spiral est appuyé contre la goupille intérieure (Fig 1); Longueur active du spiral égale virole-goupilles; influence: nulle

2 La période $A-B$ durant laquelle le spiral quitte la goupille intérieure pour aller s'appuyer contre la goupille extérieure Fig 2; longueur active du spiral égale virole-piton: influence: retard

3 La période $B-E_2$ pendant laquelle le spiral est appuyé contre la goupille extérieure Fig. 3; Longueur active du spiral égale virole-goupilles influence nulle. Si le balancier avait une amplitude plus petite que $PM-A$ il n'aurait pas de retard.

Règle

Lorsque le spiral au repos est appuyé contre l'une des goupilles il y a davantage de retard dans les grandes amplitudes que dans les petites.

Le retard est maximum pour l'amplitude qui correspond à l'instant où le spiral atteint la goupille opposée. Dès cet instant le retard diminue puisque le spiral s'appuie contre la goupille.

Ce deuxième cas ne se présente pas si la mise en marche est faite correctement nous aurions "un battage irrégulier"

Pour la pratique du réglage on peut énoncer les règles suivantes:

Lorsqu'une montre retarde dans les petites amplitudes (position verticale de la montre) ou lorsque celle-ci est en retard après 24 heures de marche

il faut s'assurer que le spiral n'a pas de jeu entre les goupilles. Pour corriger une légère avance de la montre dans les petites amplitudes on peut écarter légèrement les goupilles

Le jeu du spiral entre les goupilles de raquette crée un défaut d'isochronisme puisque son influence dépend de l'amplitude

On a imaginé différents genres de raquettes permettant de supprimer le jeu du spiral entre les goupilles, citons par exemple l'incastar. Ces dispositifs ne se sont pas généralisés parce qu'ils sont trop coûteux

Exercices de compensation

+ 4°	- 2° trop faible
+ 2°	+ 1° trop faible
- 3°	- 1° trop forte
0°	- 5° trop forte
- 2,5	- 2,5° juste
+ 4°	- 3° trop forte
- 0,5°	- 0,5° juste
+ 2°	+ 5° trop forte

Exemple de calcul pour bulletin de marche pour montre bracelet en dessous de 30mm de diamètre

Etat	Marche diurne	Variation diurne	Pos.	T.	Critères	Formules	Calculs	Sans Mention	Avec Mention
E ₁	-78								
E ₂	M ₁ +8		V.G	20'	1. Marche diurne moyenne	$\frac{E_{77} - E_1}{70}$	$\frac{+19 - (-78)}{70} = 3,7$	3 à 72	3 à 72
E ₃	M ₂ +9	V ₁	V.G	"	dans les 5 positions				
E ₄	M ₃ +7		V.H	"	2. Variation moyenne de la marche diurne	$V_1 + V_3 + V_5 + V_7 + V_9$	$\frac{7+7+5+2+2}{5} = 3,4$	6.0	4.0
E ₅	M ₄ +14	V ₃	V.H	"		5			
E ₆	M ₅ -10		V.B	"	3. Plus grande variation entre 2 marche diurne consecutive dans la même position.	$V_1 - V_3 - V_5 - V_7$ ou V_9	$V_3 = 7.0$	70.0	7.0
E ₇	M ₆ -5	V ₅	V.B	"		chiffre le plus élevé			
E ₈	M ₇ +12		H.B	"		différence entre critère 7 et M ₇ , M ₂ , etc			
E ₉	M ₈ +70	V ₇	H.B	"			$+3,7 - (-10) = 13,7$	22.0	76.0
E ₁₀	M ₉ 1-5		H.H	"	4. Plus grande différence entre la marche diurne moyenne et 7 des marche dans les 5 pos.				
E ₁₁	M ₁₀ -3	V ₉	H.H	20'					
E ₁₂	M ₁₁ -7		H.H	4'					
E ₁₃	M ₁₂ -2		H.H	20'					
E ₁₄	M ₁₃ -4		H.H	36'	5. Variation par degrés	$M_{13} - M_{77}$	$\frac{-4 - (-7)}{36-4} = 0,09$	± 7.0	± 0,7
E ₁₅	M ₁₄ +6		V.G	20'	coefficient thermique	$T_{36} - T_{4}$			
E ₁₆	M ₁₅ +77		V.G	20'	6. Reprise de marche	$M_{15} - \frac{M_1 + M_2}{2}$	$77 - \frac{8+9}{2} = 72,5$	± 70	± 7

Récapitulation

Calculer l'épaisseur du ressort; sa longueur pratique, le diamètre de la bonde pour un barillet dont le diamètre intérieure vaut 70,5 mm. On demande 7 tours de développement. (voir table page 25 du cours de rouage)

Calcul de l'épaisseur:

$$e = 0,072 \cdot 70,5 = \underline{0,117 \text{ mm}}$$

Calcul de la longueur pratique

$$L_p = 35,89 \cdot 70,5 = \underline{276 \text{ mm}}$$

Calcul du diamètre de la bonde

$$d = 0,335 \cdot 70,5 = \underline{3,5 \text{ mm}}$$

Note: Nous avons adopté 30 comme rapport entre le diamètre de la bonde et l'épaisseur du ressort.

Calculer le nombre de tours du pignon d'échappement en 1h étant donné: roue de centre 66 dents; roue moyenne 64 dents; roue de seconde 60 dents; pignon de moyenne 8 ailes; pignon de seconde 8 ailes; pignon d'échappement 6 ailes.

$$n = \frac{66 \cdot 64 \cdot 60}{8 \cdot 8 \cdot 6} = 660$$

Réponse: le pignon d'échappement fera 660 tours

Calculer le nombre d'alternance pour la montre ci-dessus roue d'échappement 75 dts

$$Ah = \frac{66 \cdot 64 \cdot 60 \cdot 2 \cdot 15}{8 \cdot 8 \cdot 6} = 14.800 \text{ ah}$$

Réponse le nombre d'alternance à l'heure est 14.800

Calculer le nombre de dent de la minuterie et de la roue à canon;
la chaussée à 72 ailes, le pignon de minuterie 70 ailes et un
cadran de 24 heures

$$Z_1 \cdot Z_2 = \frac{24 \cdot 12 \cdot 10}{7} = \underline{\underline{26 \cdot 3^2 \cdot 5}}$$

La roue à canon à 60 dents

La roue de minuterie 48 dents

Calculer le rouage d'une montre possédant une aiguille de seconde
les pignons ont 70.8 et 6 ailes la roue d'échappement 15 dents
le nombre d'alternance-heure est de 78.000.

Calculons les nombre de dents de la roue de centre
et de la petite moyenne.

$$60 = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1' \cdot Z_2'} \quad Z_1 \cdot Z_2 = 60 \cdot 10 \cdot 8 = 60 \text{ et } 80$$

80 dts pour la roue de seconde

60 dts pour la petite moyenne

Calculons le nombre de dents de la roue de seconde

$$Ah = 60 \cdot \frac{Z_3 \cdot 2 \cdot 15}{Z_3}$$

$$Z_3 = \frac{78000 \cdot 6}{60 \cdot 2 \cdot 15} = 60 \text{ dts}$$

La roue de seconde aura 60 dts

Calculer le nombre de dents de la roue de minuterie et de la
chaussée

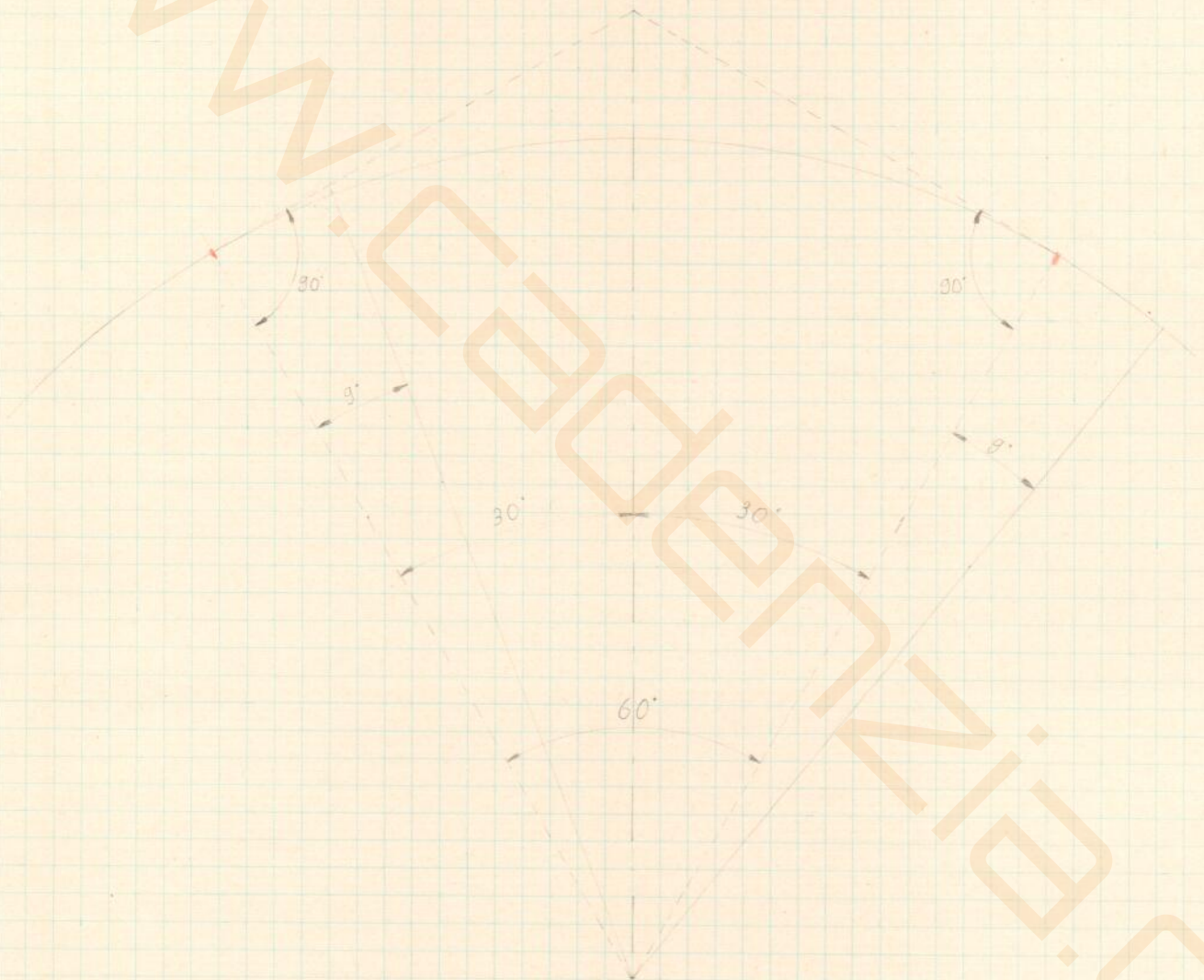
Formule pour une roue de 15 dts: $\frac{360 \cdot 2\frac{1}{2}}{15} = 60^\circ$

Pour une roue de 18 dts: $\frac{360 \cdot 3\frac{1}{2}}{18} = 70^\circ$



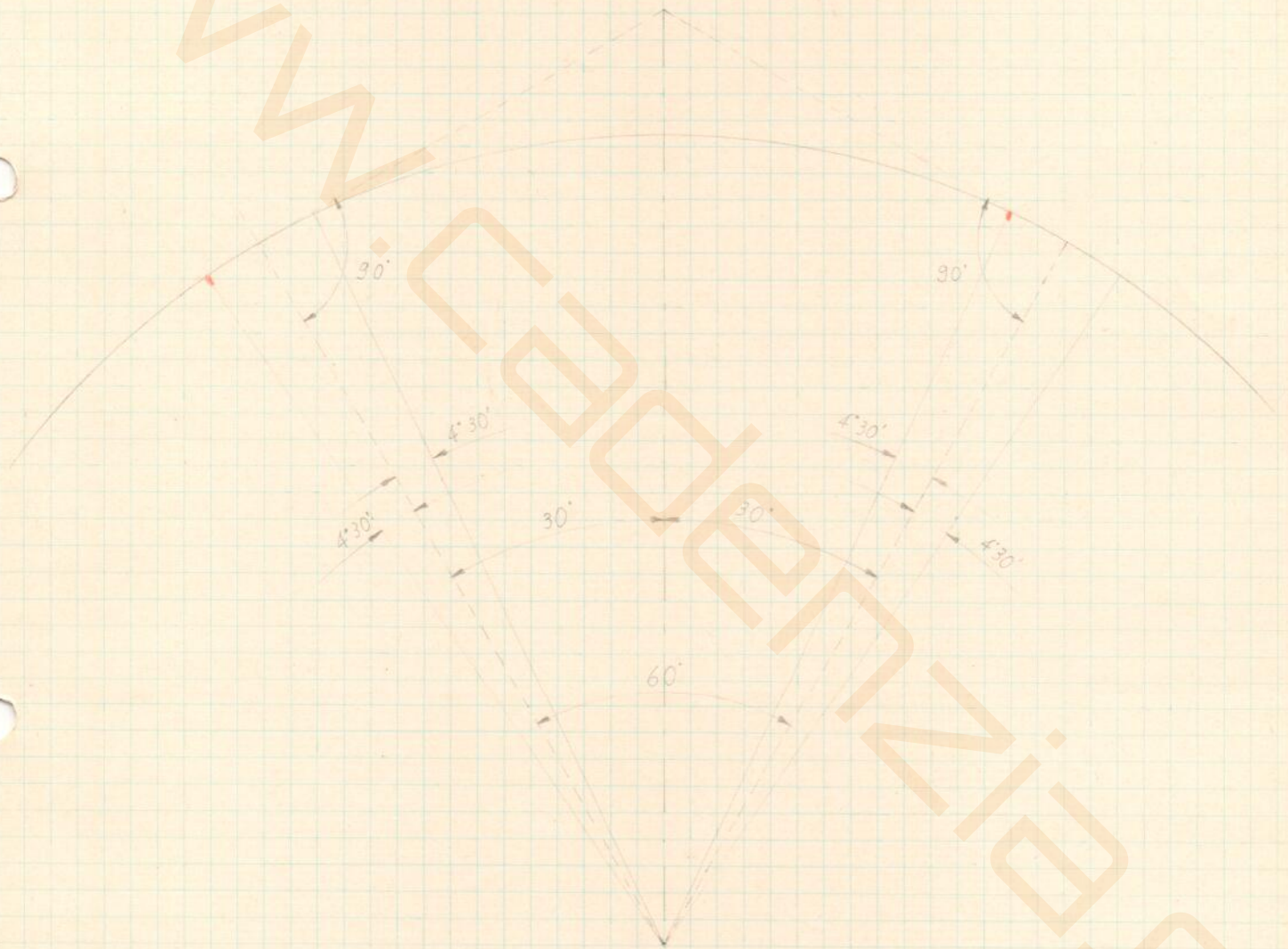
Tracé d'ancre à repos équidistants: dents pointues, distance des centres
140mm, nombre de dents 15

Formule $\frac{360^\circ \cdot 2\frac{1}{2}}{15} = 60^\circ$



Tracé d'ancre à leviers équidistants, dents pointues : roue 15 dents

$$\text{Formule. } \frac{360 \cdot 2\frac{1}{2}}{15} = 60'$$



Tracé d'ancre mixte; dents pointues; le repos est porté de 2° à gauche
roce de 75dts.

$$\text{Formule } \frac{360 \cdot 2\frac{1}{2}}{15} = 60^\circ$$

