



NOTRE METHODE



LES EXPERTS

« Conception industrielle »

NEWS SEPT 2023

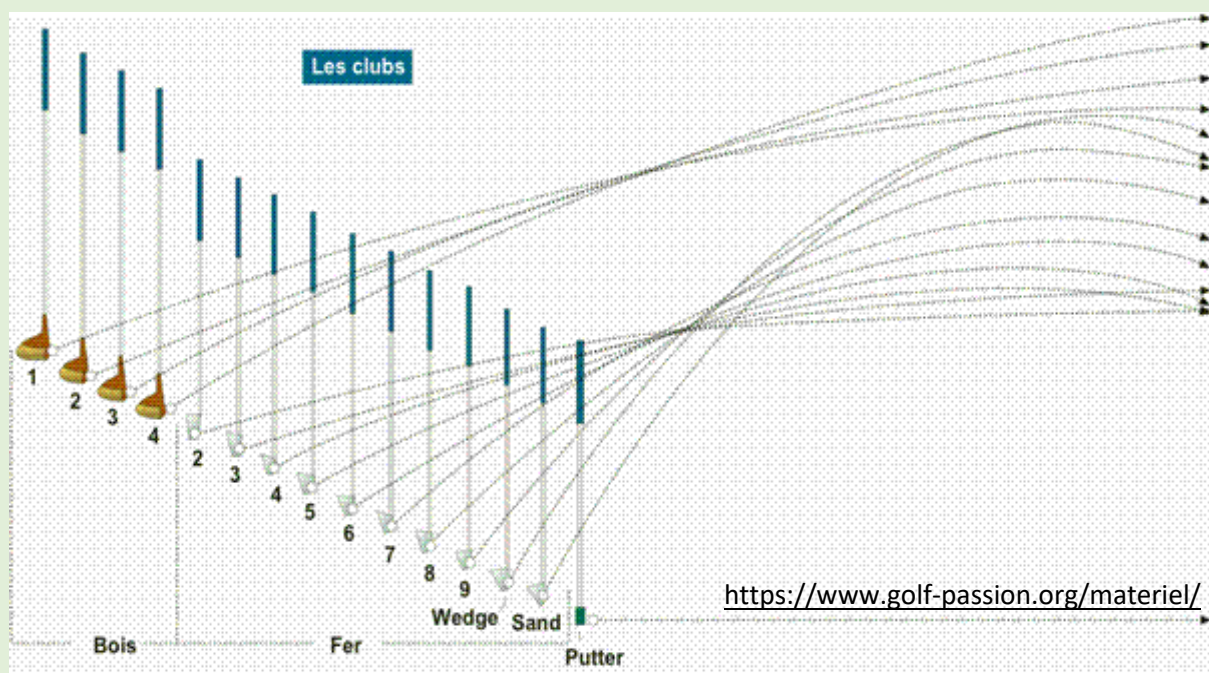
NEWS 66 : La métallurgie du golf Matériaux & procédés de fabrication des fers

1^{ère} partie : La fonderie et les fers d'approche

Depuis quelques années, nous avons décidé de nous intéresser à la métallurgie du golf en décrivant l'arrivée des drivers en alliage de titane chez les professionnels et l'accentuation de l'effet trempoline, cette enquête s'intitulait « Comment un choix matériau a obligé la fédération à revoir la norme liée aux drivers ? » [1]. Nous allons poursuivre notre réflexion en s'intéressant, cette fois-ci, aux autres clubs de parcours, en nous focalisant sur les techniques de fabrication et la métallurgie des aciers utilisés pour les fers. Mais avant tout, un petit rappel sur la conception de ce club s'impose, avant d'aborder pour les 3 prochaines newsletter : la fonderie des fers, l'estampage des clubs et l'émergence de la fabrication additive dans le golf.

I. Rappels sur la conception des fers

Un set de golf est composé au maximum de 14 clubs. On y trouve le driver (considérés comme le bois N°1), les bois de parcours, les fers, les wedges (pour les coups inférieurs à 100 m ou pour sortir d'un bunker ou des herbes hautes (« rough profond »)) et pour finir sur le green le putter (Cf. Figure 1).



<https://www.golf-passion.org/materiel/>

Figure 1 : Description des différents types de club de golf.



NOTRE METHODE



LES EXPERTS

« Conception industrielle »

NEWS SEPT 2023

Chaque club est composé de 3 parties : un grip (extrémité en caoutchouc permettant de tenir le club), un shaft plus ou moins rigide (en acier ou graphite, c'est la partie liant le grip à la tête) et une tête mono-composant (forgée ou moulée) ou assemblée pour frapper la balle. (Cf. figure 2)
Aussi bien les bois que les fers, ils sont numérotés en fonction de leur niveau d'ouverture (le loft). Plus le numéro est petit, plus l'angle du loft est faible et plus la distance parcourue sera élevée.

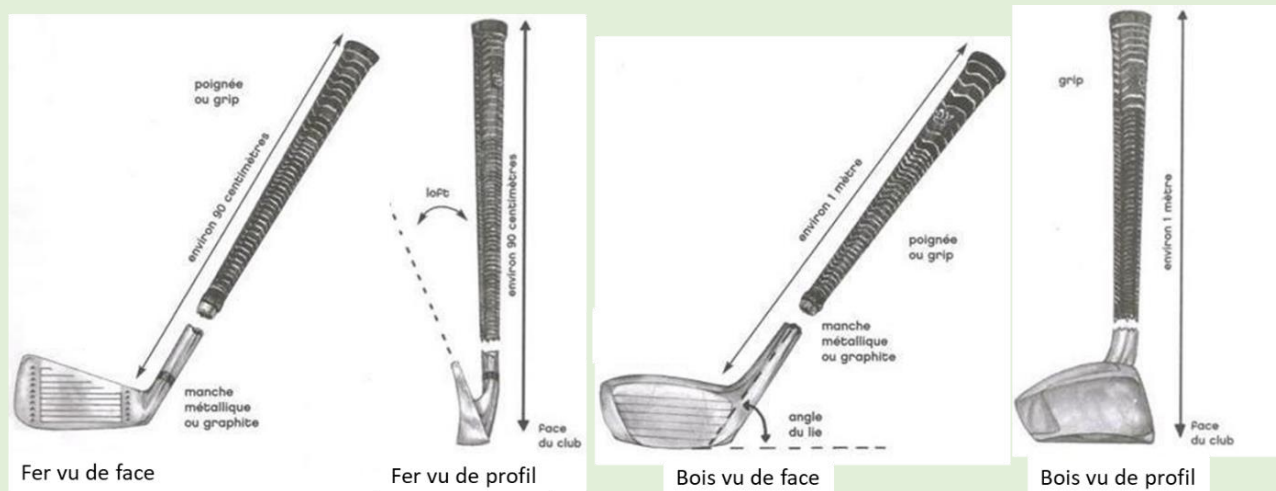


Figure 2 : Description d'un fer et d'un bois.[2]

Les caractéristiques principales d'un fer sont l'inclinaison du manche (le lie), l'ouverture de la face (le loft), l'épaisseur de la semelle, le matériau utilisé pour la face de frappe, le point d'équilibre du club (le swingweight) et la flexibilité du manche (ou shaft), sans oublier la taille du « sweet spot » (zone spécifique de la face du club où la balle de golf doit être frappée pour des résultats optimaux (moment d'inertie élevée)).

Pour ce dernier paramètre, un des plus cruciaux, le design de la tête joue un rôle important. En concentrant le poids de la tête du club de golf autour du périmètre du club plutôt qu'au centre, on optimise la surface de « frappe idéale ». Ce concept est appelé « Perimeter Weighting » (Cf. figure 3) Cet astuce permettra de réduire les vibrations et la torsion de la tête dans le cas où la balle n'est pas parfaitement frappée au centre de la face.



NOTRE METHODE



LES EXPERTS

« Conception industrielle »

NEWS SEPT 2023



Figure 3 : Exemple du « Perimeter Weighting » sur un fer 7 de chez Cleveland (CG 16).

Cette forme particulière peut être obtenue soit directement par moulage, soit par usinage ou soit par forgeage.

II. Les procédés de fabrications

La conception des clubs de golf a une longue histoire d'évolution. Il existe 2 techniques de fabrication destinées aux gros volumes : la fonderie « à cire perdue » et l'estampage. Pour des petites séries, l'utilisation de l'impression 3D (fabrication additive) permet de réaliser des géométries très complexes difficilement, voire impossible à reproduire à l'aide des méthodes de fabrication traditionnelles.

a) La fonderie à cire perdue

Encore appelée fonderie à modèles non permanents, cette technologie est utilisée depuis des décennies dans le monde de l'art, plus particulièrement pour la duplication de sculptures en bronze.

Compte tenu des avantages de cette technologie (forme complexe, précision dimensionnelle (concept « net shape »), état de surface soigné, adaptée pour de nombreux matériaux métalliques : base fer, nickel ou encore cobalt), l'industrie du golf a très vite compris l'intérêt de ce procédé d'élaboration.



NOTRE METHODE



LES EXPERTS

« Conception industrielle »

NEWS SEPT 2023

Le procédé « cire perdue » est composé de différentes étapes :

- Les étapes de préparation du moule :

Il s'agit de **réaliser un modèle en cire** ou résine à l'image de la tête de club que l'on souhaite fabriquer (Cf. figure 4). Le modèle aura toujours un volume légèrement plus grand que la pièce métallique finale compte tenu des phénomènes de retrait associés aux phénomènes de solidification. Une fois que l'on a élaboré plusieurs modèles de tête de façon industrielle en injectant de la cire dans un moule à l'image des procédés d'injection plastique, **une « grappe en cire »** est réalisée.

Cet assemblage représente le volume à remplir avec le métal liquide. Il sera composé : d'un entonnoir de coulée, d'un système d'alimentation et d'un réseau d'évacuation des gaz.

La grappe va ensuite être enrobée d'une succession de couches de céramique pour obtenir la **formation après séchage d'une carapace**.

Cet amalgame composite mi-cire, mi- céramique sera ensuite placée dans une autoclave de **décirage** qui permettra d'obtenir un volume en négatif de l'arbre en cire. Le moule est prêt à être utilisé pour la coulée.



Figure 4 : Conception d'une grappe [3], [11].



NOTRE METHODE



LES EXPERTS

« Conception industrielle »

NEWS SEPT 2023



<= Figure 5 : Après la coulée. [3], [11].

Les étapes associées à la coulée :

L'opération de coulée a pour objectif de verser le métal liquide dans la carapace exempt de cire. On obtiendra une réplique métallique de l'arbre en cire. Afin d'éviter l'éclatement du moule à cause de chocs thermiques trop violents, il est nécessaire de le chauffer préalablement à une température proche de la température de fusion de l'alliage que l'on souhaite coulée.

Durant **le refroidissement**, le métal liquide se solidifie. Si cette opération n'est pas maîtrisée, des tapures (fissures) peuvent apparaître suite à des gradients thermiques trop élevés au sein de la grappe. L'objectif est donc d'assurer un refroidissement le plus homogène possible. Il est également nécessaire que la zone d'alimentation se solidifie en dernier afin de piéger les retassures liées au retrait du passage de l'état liquide à solide.

Une fois à température ambiante, **un décochage** par vibration est réalisé pour ôter la céramique de l'assemblage métallique obtenu. Les pièces seront ensuite désolidarisées du système d'alimentation par tronçonnage pour être ensuite meulées et envoyées à l'atelier d'usinage.

Les aciers utilisés pour cette technologie sont principalement des aciers inoxydables, mais on peut également trouver des aciers de construction et des fontes. Les structures métallurgiques obtenues sont directement issues de la transformation liquide – solide. On parle de structure dendritique (Figure 6) dans laquelle on trouvera quelques porosités.



NOTRE METHODE



LES EXPERTS

« Conception industrielle »

NEWS SEPT 2023

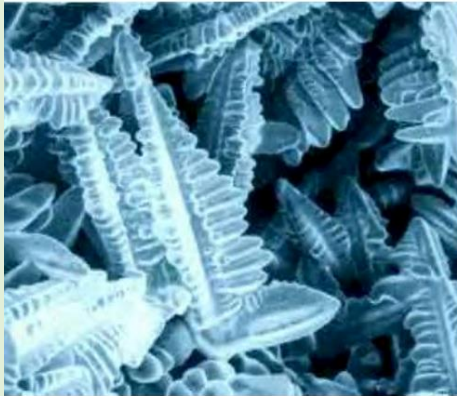


Figure 6 : Dendrites de solidification : photo 3D obtenu au microscope électronique à balayage et représentation schématique 2D des grains de solidification.

La prochaine NEWS s'intéressera au 2^{ème} procédé de fabrication majeur que l'on rentre dans le monde du golf : l'estampage.

Alexandre FLEURENTIN
Expert près de la cour d'appel de Paris
Matériaux Métalliques
Corrosion & Traitements de surface
Traitements thermiques & Tribologie

Sources d'informations

[1] A. FLEURENTIN, s'intitulait « Comment un choix matériau a obligé la fédération à revoir la norme liée aux drivers ? », Traitements & Matériaux N°461, déc. 2019.

[2] <https://www.golf-passion.org/materiel/>

[3] Source documentaire de la société PING : https://www.youtube.com/watch?v=RJ8_XChCtBU

[11] <https://affordablehas-hvac.com/fr/forg%C3%A9s-vs-moul%C3%A9s-does-it-even-matter>.
(09/2021)

Remerciements :

Nous tenions à remercier Nicolas Marchand représentant pour les marques Cleveland, Srixon et Xxio pour les échanges que nous avons pu avoir sur le sujet, et les élèves du lycée Diderot promotion 2020 qui ont observé les structures métallurgiques des têtes de club de golf que vous avez pu observer dans cet article.



NOTRE METHODE



LES EXPERTS

« Conception industrielle »

NEWS SEPT 2023

News 67 : La métallurgie du golf Matériaux & procédés de fabrication des fers

2^{ème} Partie : L'estampage des clubs de golf

Souvent les golfeurs se posent la question : dois-je acquérir un club moulé ou forgé... Dans cette réflexion quasi christique pour un golfeur, nous vous proposons de poursuivre notre réflexion technico-ludique en décrivant le procédé d'estampage utilisé pour la fabrication des fers d'approche. Nous en profitons pour partager avec vous notre 10^{ème} anniversaire, le temps passe !

II. Les procédés de fabrications

La conception des clubs de golf a une longue histoire d'évolution. Il existe 2 techniques de fabrication destinées aux gros volumes : la fonderie « à cire perdue » et l'estampage. Pour des petites séries, l'utilisation de l'impression 3D (fabrication additive) permet de réaliser des géométries très complexes difficilement, voire impossible à reproduire à l'aide des méthodes de fabrication traditionnelles.

b) L'estampage, une opération de forgeage à chaud pour les aciers

Cette technique diffère de la précédente puisque le métal n'est pas chauffé au-dessus de sa température de fusion, mais aux alentours de 1200°C pour subir différentes opérations de mise en forme. Les lopins proviennent initialement de barres laminées (longueur 6 m diamètre 30 mm) qui seront cisailées (Cf. Figure 7a).

La première opération de mise en forme en vue de préparer la matière à l'opération d'estampage est un profilage conique par roulage suivi d'un cambrage à chaud (figure 7b). Cette préforme, que l'on retrouve chez Mizuno, n'est pas systématique chez les autres fabricants. La mise en forme est ensuite réalisée dans des matrices d'estampage pour faire subir au lopin en acier une succession de frappe à chaud (Cf. figure 7c), les bavures inerrantes au procédé peuvent être ôtées à chaud mais également à froid [6], cela dépend de l'usine.

Selon les fabricants, certains d'autres eux réchauffent les préformes pour effectuer un forgeage dit de précision à des températures intermédiaires (650 à 800°C), on parle de forgeage mi-chaud. L'abaissement de la température et l'augmentation de la vitesse de déformation permet d'affiner la structure corroyée par un phénomène que l'on nomme la recristallisation dynamique. D'autres compagnies préfèrent passer directement à un calibrage léger à froid qui sera suivie des opérations de parachèvement (usinage, polissage) et de traitements de surface (figure 8).



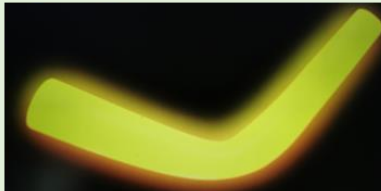
NOTRE METHODE



LES EXPERTS

« Conception industrielle »

NEWS SEPT 2023



a) Cisaillage
Chauffage $\sim 1200^{\circ}\text{C}$

b) Profilage conique
Cambrage à chaud

c) Estampage
Ebavurage

Figure 7 : illustration d'une gamme d'estampage [4], [5], [6], [11].



NOTRE METHODE



LES EXPERTS

« Conception industrielle »

NEWS SEPT 2023



4) Réchauffage
Forgeage de précision



5) Calibrage à froid ou
mi-chaud



5) Usinage et
traitement de surface

Figure 8 : Etapes de parachèvement.

La forgeabilité d'un métal est définie comme étant l'aptitude de ce métal à subir une mise en forme par écoulement plastique, sans apparition de défauts, dans les conditions de déformations données. Elle dépend à la fois des caractéristiques du matériau (composition chimique, microstructure, état surfacique (défauts), loi d'écoulement,...) et du procédé de mise en forme (température, vitesse de déformation, nature des sollicitations, conditions de frottement, lubrifiant utilisé,...). Les aciers utilisés pour cette technologie sont essentiellement des aciers de construction pour la fabrication des tête de club de golf.

Les structures métallurgiques obtenues ne sont plus dendritiques, puisque ces dernières ont été écrasées durant l'opération de mise en forme. On parle d'une structure fibrée ou corroyée, voir écrouie pour les parties calibrées à froid. La figure 9 schématise la grosse différence existante entre une pièce moulée et une pièce forgée : le fibrage de la matière. Ce phénomène va avoir un rôle sur la raideur de la pièce mais également sur sa tenue en fatigue, sa capacité à propager des ondes vibratoires, ...



NOTRE METHODE



LES EXPERTS

« Conception industrielle »

NEWS SEPT 2023

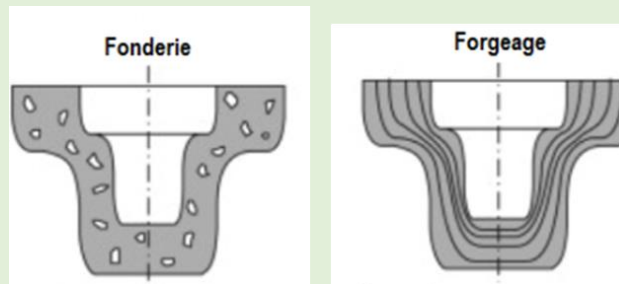


Figure 9 : Schéma d'une macrostructure moulée et forgée.

Le « shaft » pourra ensuite être assemblé à la tête usinée et revêtue, pour lutter contre la corrosion et par souci d'esthétisme, soit par collage ou soit par soudage friction. La prochaine NEWS portera sur une technologie émergente depuis quelques années : la fabrication additive, procédé que ce sont empressés d'utiliser les golf-makers.

Alexandre FLEURENTIN
Expert près de la cour d'appel de Paris
Matériaux Métalliques
Corrosion & Traitements de surface
Traitements thermiques & Tribologie

Sources d'informations

[4] Source documentaire de la société Mizuno : <https://www.youtube.com/watch?v=Uy4vTej97b8>

[5] Source documentaire de la société Miuari : <https://www.youtube.com/watch?v=Khh0g91P2S8>

[6] https://www.youtube.com/watch?v=_VsbIHKKKaE

[11] <https://affordablehas-hvac.com/fr/forg%C3%A9s-vs-moul%C3%A9s-does-it-even-matter>.
(09/2021)

Remerciements :

Nous tenions à remercier Nicolas Marchand représentant pour les marques Cleveland, Srixon et Xxio pour les échanges que nous avons pu avoir sur le sujet, et les élèves du lycée Diderot promotion 2020 qui ont observé les structures métallurgiques des têtes de club de golf que vous avez pu observer dans cet article.