

Corrigé de la série 6.

Exercice 1

- a) Le prix unitaire p_{unit} se décompose en un coût de production p_{prod} , un coût d'outillage p_{out} et un coût de matière p_{mat} :

$$p_{\text{unit}} = p_{\text{prod}} + p_{\text{out}} + p_{\text{mat}} \quad (1)$$

Nous nous proposons, dans ce qui suit, d'évaluer ces trois contributions.

Remarque 1 *Suivant le contexte et le modèle d'affaire, il pourrait être nécessaire de prendre en compte un coût de stockage ainsi que des frais d'expédition. Pour maintenir l'analyse à un niveau de complexité raisonnable, nous ne considérerons pas ces contributions ici.*

- i) Le coût de matière est proportionnel à la masse des pièces m donné en g. On l'obtient en faisant le calcul

$$p_{\text{mat}} = \frac{mp_{\text{spec}}}{1'000} \text{ Frs} \quad (2)$$

où p_{spec} est le prix spécifique de la matière injectée comptée en Frs/kg. Le facteur 1'000 est là pour rétablir les unités.

Remarque 2 *Des frais additonaux lié au recyclage de la matière solidifiée en trop (carottes dans le canal d'injection) pourraient aussi être considérés, mais ils sont généralement marginaux.*

- ii) Le coût d'outillage se calcule en répartissant le prix M (en kFrs) du moule et de son développement sur chacune des N pièces à produire. On a :

$$p_{\text{out}} = \frac{1'000M}{N} \text{ Frs} \quad (3)$$

- iii) Pour finir, le coût de production s'obtient en multipliant le taux horaire total de production R , mesuré en Frs/h et le temps de cycle τ nécessaire à fabriquer une pièce et mesuré en s :

$$p_{\text{prod}} = \frac{R\tau}{3'600} \text{ Frs.} \quad (4)$$

Avec (2)-(4), la formule (1) pour le prix unitaire devient

$$p_{\text{unit}} = \underbrace{\frac{R\tau}{3'600}}_{\text{coût de prod.}} + \underbrace{\frac{1'000M}{N}}_{\text{coût d'ouillage}} + \underbrace{\frac{mp_{\text{spec}}}{1'000}}_{\text{coût de matière}}. \quad (5)$$

Il reste à calculer le taux horaire R . Il se compose du coût horaire de l'utilisation de l'outil de production (la presse) R_{presse} et du coût horaire de la main d'œuvre $R_{\text{m.d.o.}}$:

$$R = R_{\text{presse}} + R_{\text{m.d.o.}} \quad (6)$$

Remarque 3 *Un loyer pour l'occupation des locaux de l'entreprise pourrait aussi être intégré dans le taux horaire R .*

Puisque la presse doit être amortie sur n années et que cet investissement est censé rapporter un taux d'intérêt i par année, le coût horaire de l'utilisation de la presse est

$$R_{\text{presse}} = \frac{P}{nN_{\text{heures}}} + \frac{iP}{N_{\text{heures}}}.$$

où N_{heures} le nombre d'heures d'utilisation de la machine par année. Dans notre cas, on prévoit que la presse soit utilisée à 75% du temps en trois huit

$$N_{\text{heures}} = 0.75 \times 365 \times 24 = 6'570 \text{ h.}$$

Avec les données numériques pour $P = 1'000'000 \text{ Frs}$, $n = 5$ ans et $i = 5\%$, on trouve que

$$R_{\text{presse}} = \frac{1'000'000}{5 \times 6'570} + \frac{0.05 \times 1'000'000}{6'570} \simeq 38.05 \text{ Frs/h} \quad (7)$$

Finalement, le taux horaire de la main d'œuvre $R_{\text{m.d.o}}$ vaut :

$$R_{\text{m.d.o}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} n_{\text{empl};i} R_{\text{empl};i}}{N_{\text{heures}}}$$

où N_{heures} est encore le nombre d'heures d'utilisation de la machine par année, où N est le nombre de type d'employés, $n_{\text{empl};i}$ le nombre d'employés en équivalent plein temps de type i et dévolu à la mise en route, au maintien et à l'exploitation de la presse et $R_{\text{empl};i}$ le salaire annuel des employés de type i . Avec les données, on a que

$$R_{\text{m.d.o}} = \frac{0.5 \times 150'000 + 1.5 \times 100'000 + 0.25 \times 90'000}{6'570} \approx 37.68 \text{ Frs/h} \quad (8)$$

En portant les informations (7) et (8) dans la formule (6), on obtient la valeur numérique du taux horaire R :

$$R = 38.05 + 37.68 = 75.72 \text{ Frs/h} \quad (9)$$

Le prix unitaire des trois pièces considérées s'obtient alors en utilisant la formule (5) avec les valeurs numériques de R (9) ainsi que celles de M (prix du moule), τ (temps de cycle), N (taille de série), m (masse) et p_{spec} (prix spécifique). Les détails des résultats sont donnés dans la Tab. 3

	pièce No 1	pièce No 2	pièce No 3
coût de prod.	2.21	13.89	1.58
coût de matière	6.25	11.10	2.86
coût d'outillage	1.25	1.41	2.80
prix unitaire	9.71	26.40	7.24

TABLE 3 – Détails des coûts en Frs/pièce

- b) Dans le cas de la pièce Nr. 2, on observe un coût de production nettement supérieur au coût d'outillage. Dans une telle situation il est souvent possible de fabriquer de façon plus économique en investissant dans l'outillage afin de diminuer le temps de cycle. Pour rendre

compte de ce fait, on imagine que le temps de cycle τ devient un paramètre libre dont il faut déterminer la valeur et qui va influencer le prix M du moule. On appelle τ_0 le temps de cycle initialement prévu : $\tau_0 = 660$ s et M_0 le prix du moule correspondant à cette situation : $M_0 = 112.5$ kFrs. La loi qui vous est donnée par l'atelier est que le produit du prix de moule par le temps de cycle est une constante, de sorte que plus le temps de cycle est court, plus le moule est cher et inversément :

$$M\tau = M_0\tau_0 \implies M = \frac{M_0\tau_0}{\tau}. \quad (10)$$

Dans ces conditions la formule (5) fait apparaître le prix unitaire de la pièce Nr. 2 comme une fonction du temps de cycle :

$$p_{\text{unit}}(\tau) = \frac{R\tau}{3'600} + \frac{1'000M_0\tau_0}{N\tau} + \frac{mp_{\text{spec}}}{1'000}.$$

Si on remplace les paramètres M_0 , τ_0 , N , m , p_{spec} et R (9) par leurs valeurs numériques :

$$M_0 = 112.5 \text{ kFrs}, \tau_0 = 660 \text{ s}, N = 80'000, m = 185 \text{ g}, p_{\text{spec}} = 60 \text{ Frs/kg}, R = 75.72 \text{ Frs/h}$$

on obtient que :

$$p_{\text{unit}}(\tau) \simeq \underbrace{0.02103\tau}_{\text{terme lin. en } \tau} + \underbrace{\frac{928.125}{\tau}}_{\substack{\text{terme harm. en } \tau}} + \underbrace{11.10}_{\text{terme indép. de } \tau} \quad (11)$$

On observe que le prix unitaire est **infini** dans les deux cas extrêmes, soit lorsque $\tau \rightarrow 0$, à cause du terme harmonique qui correspond au prix d'outillage, et lorsque $\tau \rightarrow \infty$, à cause du terme linéaire qui correspond au prix de production. La situation est illustrée sur la Fig. 1 où on représente graphiquement la valeur de $p_{\text{unit}}(\tau)$ en fonction de τ :

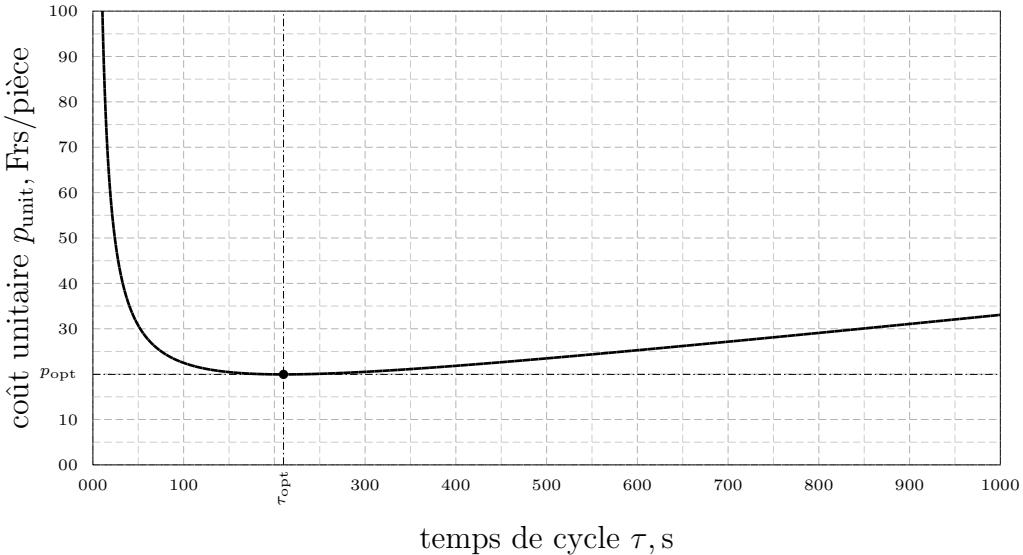


FIGURE 1 – Le graphe de la fonction $\tau \rightarrow p_{\text{unit}}(\tau)$.

Cette figure démontre l'existence d'un temps de cycle τ_{opt} qui minimise le prix unitaire. On détermine la valeur de τ_{opt} en annulant la dérivée $p'_{\text{unit}}(\tau)$ de la fonction $p_{\text{unit}}(\tau)$ (11) :

$$0 = p'_{\text{unit}}(\tau_{\text{opt}}) = 0.02103 - \frac{928.125}{\tau_{\text{opt}}^2}.$$

En résolvant pour τ_{opt} , on obtient :

$$\tau_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{928.125}{0.02103}} \simeq 210.08 \text{ s.} \quad (12)$$

On peut alors utiliser la formule (10) pour estimer le prix du moule qui permet de réaliser ce temps de cycle :

$$M_{\text{opt}} \simeq \frac{112.5 \times 660}{210.08} \simeq 353.436 \text{ kFrs.} \quad (13)$$

Le gain économique réalisé en optant pour la situation optimale est illustré par la Tab. 4 :

	solution de départ	solution optimale
coût de prod.	13.89	4.42
coût de matière	11.10	11.10
coût d'outillage	1.41	4.42
prix unitaire	26.40	19.94

TABLE 4 – Prix unitaires en Frs pour les deux stratégies de fabrication considérées

On observera que la solution optimale correspond à un exact équilibre entre les coûts de production et d'outillage et qu'elle permet de fabriquer la pièce pour près de 7 Frs de moins à l'unité.

Exercice 2

On vous demande de remplir la Tab. 1 avec les mots ou les morceaux de phrase qui permettent de donner un sens au texte lacunaire ci-dessous :

Par opposition à l'usinage qui est un procédé ablatif et à l'impression 3d qui est une procédé **additif**, la fonderie est un procédé **réplicatif**. Cela veut dire que la pièce est obtenue en déformant la matière dans un outil de **forme**. Cet outil est appelé **moule**. En fonderie classique, la matière dans laquelle cet outil est fait est le **sable**. Celui-ci est généralement agglomérée autour d'un objet appelé **modèle** qui a exactement la **forme** de la pièce à produire et qui est dit **maître** s'il peut être réutilisé pour fabriquer plusieurs outils ou alors **perdu** si on doit le détruire à chaque fois. Le procédé de fonderie **à cire perdue** est un exemple où cet objet est à usage unique et où il est fabriqué en **cire**. Le procédé dit de **moulage en motte** appliqué pour fabriquer les caquelons à **fondue** est par contre un exemple où cet objet ne doit pas être reconstitué à chaque fois.

Il existe une situation particulière dans laquelle la fonderie au sable n'est pas la dernière étape d'une chaîne de procédés duplicative. Dans cet exemple l'outil de forme sera fabriqué par un procédé **additif**, au cours duquel on consolide le sable de fonderie couche par **couche** en déposant un liant chimique à l'aide d'une **tête d'impression**.

Il est parfaitement possible en fonderie de fabriquer des pièces avec des cavités internes (e.g. des tuyaux). Pour cela, il faut installer des **noyaux** à l'intérieur de l'outil utilisé pour fabriquer la pièce. L'opération qui consiste à fabriquer ces objets est le **noyautage**. L'opération qui consiste à détruire ces objets pour dégager la cavité interne de la pièce est le **débourrage**.

En fonderie, il y a un risque important que la pièce obtenue après décochage ne soit pas complète. On fait référence à ce problème en parlant de malvenue ou de **goutte froide** et on considère souvent qu'il est lié à une mauvaise **coulabilité** du métal utilisé. Cette propriété particulière peut être mesurée a priori en coulant un échantillon de métal fondu dans un instrument appelé spirale de **Cury** puis en mesurant la **distance** que cette matière **parcourt** avant d'être complètement solidifiée.

Outre la cavité réservée à la pièce, l'outil utilisé en fonderie comporte généralement une autre cavité qui correspond à la **masselotte**. Cette pièce est notamment là pour alimenter la cavité principale en métal fondu lorsque celui-ci se **retire** en se solidifiant.

-
- (1) additif
 - (2) réplicatif
 - (3) forme
 - (4) moule
 - (5) sable
 - (6) modèle
 - (7) forme
 - (8) maître
 - (9) perdu
 - (10) à cire perdue
 - (11) cire
 - (12) moulage en motte
 - (13) fondue
 - (14) additif
 - (15) couche
 - (16) tête d'impression/buse/imprimante 3d
 - (17) noyaux
 - (18) noyautage
 - (19) débourrage
 - (20) goutte froide
 - (21) coulabilité
 - (22) Cury
 - (23) distance
 - (24) parcourt
 - (25) masselotte
 - (26) retire
-

TABLE 1 – Liste des morceaux de phrase complétant le texte lacunaire