



HAL
open science

Les sables de moulage : une autre façon de mesurer leurs propriétés

Didier Lasseux, Jean-Marie George

► **To cite this version:**

Didier Lasseux, Jean-Marie George. Les sables de moulage : une autre façon de mesurer leurs propriétés. *Hommes-et-fonderie*, 2004, 343, pp.22-27. hal-03827927

HAL Id: hal-03827927

<https://hal.science/hal-03827927>

Submitted on 24 Oct 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les sables de moulage : une autre façon de mesurer leurs propriétés

■ **Didier LASSEUX et Jean-Marie GEORGE**

TREFLE (UMR CNRS 8508) – ENSAM Talence

Résumé

Les propriétés du sable de fonderie déterminent non seulement son aptitude à fabriquer le moule mais également la qualité des pièces qu'il est destiné à mouler. De nombreux critères sont classiquement contrôlés afin de caractériser ce sable et une étude préliminaire a permis de mettre en évidence des relations empiriques entre les diverses propriétés caractéristiques du sable.

A l'issue de cette étape, la perméabilité a été retenue comme paramètre important dans la qualification d'un sable. Typiquement, en fonderie, sa mesure est réalisée dans un laboratoire par prélèvements coordonnés avec la production. Cette méthode présente cependant l'inconvénient de ne pas toujours être représentative. En effet, la mesure est d'une part, décalée en temps par rapport à l'opération de moulage, et d'autre part elle est pratiquée sur un échantillon de taille et de forme différentes de celle du moule conduisant à des conditions d'écoulement nécessaire à la mesure également différentes de l'écoulement réel à la coulée. Notre travail a consisté à concevoir et réaliser un appareil prototype de mesure de la perméabilité du moule, sur la chaîne de fabrication, avant la coulée du métal liquide. Ce dispositif a été éprouvé sur site industriel.

Observation contextuelle

Dans une fonderie spécialisée dans la fabrication de pièces de sécurité en fonte à graphite sphéroïdal, l'observation des causes de rebuts a permis de mettre en évidence que le sable de moulage pouvait être mis en cause dans 60 % des cas. Parmi les principales manifestations, on peut citer, le mauvais état de surface des pièces, les dégagements gazeux source de porosités, le grésage, le carbone brillant provenant du noir minéral (Rochier, 1989 ; Baier et Koppen, 1994).

La chaîne de fabrication fonctionnant en production 16 heures par jour, ce sont 2 000 tonnes de sable silico-argileux qu'il faut préparer quotidiennement. Ce sable, continuellement en circuit, du poste de préparation jusqu'à la coulée, en passant par le moulage, est reconditionné chaque heure. Le reconditionnement consiste essentiellement en une re-humidification et des ajouts de composants frais nécessaires durant le malaxage.

La variété des moulages, caractérisés soit par le volume de fonte coulée, soit par la masse de noyau incluse dans le moule, implique la préparation de quatre formulations de sable de moulage différentes et ce afin de prendre en compte et d'anticiper l'évolution des différents composants.

Plusieurs fois par poste, des prélèvements sont effectués à la sablerie afin de mesurer les propriétés utiles à la mise en œuvre. Les propriétés mesurées en laboratoire sont la teneur en eau, la

teneur en argile, la teneur en fines, la teneur en noir minéral, la perméabilité, la granulométrie, ainsi que les caractéristiques mécaniques telles que la résistance à la compression la résistance au cisaillement, la dureté superficielle et l'aptitude au serrage (CTIF, 1989).

L'analyse des résultats de ces mesures indique que ces paramètres évoluent peu en phase de production. De plus une variation détectée en laboratoire est aussitôt corrigée dans l'étape de production du sable afin que les tolérances définies sur chaque paramètre ne soient pas dépassées. Cependant, le rebut de pièces pour défauts imputables au sable ne concerne pas toujours un cas isolé, mais indique plutôt une dérive globale de la qualité. Ce constat suscite donc l'interrogation quant à l'adéquation de la méthode de contrôle au besoin et à l'exploitation faite de la quantité d'informations prélevées.

Relations entre les propriétés mesurées

A partir de ce constat, un travail a été entrepris consistant à mener des campagnes d'essais afin de vérifier l'incidence de la variation d'un composant sur l'ensemble des propriétés. La méthode des plans d'expériences a été mise à profit afin d'établir des modèles de comportement de chacune des propriétés mesurées (Goupy, 1996). Cette méthode présente l'avantage de mener rigoureusement l'expérimentation en minimisant le nombre d'essais.

Les paramètres d'entrée, retenus comme étant les plus influents sur la qualité du sable préparé, sont les mêmes que ceux utilisés par l'opérateur pour apporter les corrections nécessaires en cours de production. Ces paramètres sont : la teneur en eau, la teneur en argile (bentonite), la teneur en noir minéral, la température du sable, la teneur en fines et le degré de serrage. Nous avons choisi de faire varier ces paramètres sur quatre niveaux.

Pour ce plan d'expériences, les paramètres de sortie sélectionnés comme étant les plus représentatifs de la qualité du sable sont la perméabilité, la dureté superficielle, la résistance à la compression et l'aptitude au serrage. A l'issue de chaque préparation de sable réalisée avec une combinaison des paramètres d'entrée déterminée suivant le plan d'expériences, les paramètres de sortie sont mesurés. L'exploitation du plan complet consiste finalement à rechercher les relations qui corréleront de manière optimale les paramètres d'entrée et de sortie. A titre d'exemple, pour le paramètre de sortie perméabilité, une corrélation du type

$$P = \alpha \frac{T^a B^b}{S^c E^d N^e} + \beta F \quad (1)$$

a été obtenu, relation dans laquelle T , B , S , E , N et F représentent respectivement la température, la teneur en bentonite, le

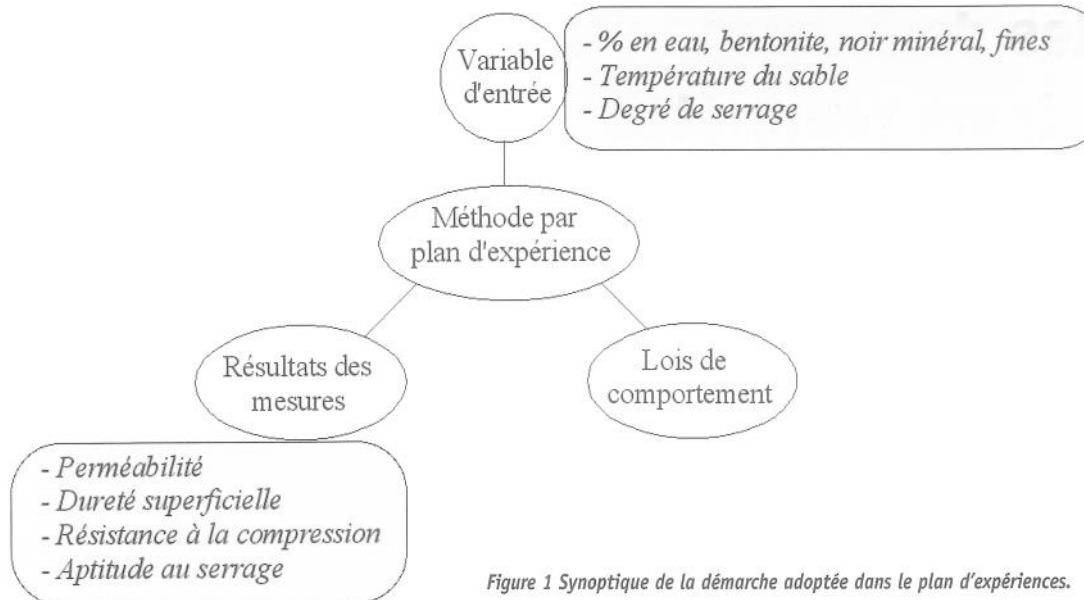


Figure 1 Synoptique de la démarche adoptée dans le plan d'expériences.

degré de serrage, la teneur en eau, la teneur en noir minéral et la teneur en fines, tandis que les coefficients α , a , b , c , d , e , et β sont le résultat d'un calage sur les résultats expérimentaux. Des résultats similaires ont été obtenus sur les autres paramètres de sortie (Caubit et Dubedout, 2001). De manière synoptique, la démarche peut-être résumée comme indiqué sur la figure 1.

Pour finir, ces modèles ont été confrontés de manière tout à fait satisfaisante à des résultats de mesure disponibles sur site industriel. Les relations obtenues constituent donc un modèle de comportement du sable qui peut être utilisé à des fins prédictives (lorsque l'on souhaite prévoir les caractéristiques mécaniques d'un sable à partir de sa composition et de sa préparation). En inversant ce modèle, (i.e. en inversant les relations obtenues à l'aide du plan d'expériences), on dispose d'un modèle d'aide à la préparation fournissant la composition et la préparation à mettre en œuvre pour obtenir des propriétés mécaniques requises. Dans le cas présenté ici, on voit que l'inversion n'est possible que si l'un des paramètres d'entrée initiaux du plan d'expériences évoqué plus haut est connu. Cette démarche représente une alternative intéressante à celle actuellement suivie dans la mesure où I) elle diminue de manière très significative le nombre de mesures à effectuer, II) elle permet de déduire soit le comportement mécanique du sable si les mesures portent sur les paramètres de composition et de préparation soit les paramètres de préparation du sable si les mesures portent sur ses propriétés mécaniques.

Une propriété importante : la perméabilité

Dans de nombreux cas, les défauts constatés sur les pièces sont imputables à un mauvais échappement des gaz à la coulée. Suite à la campagne d'essais évoquée plus haut et à l'observation des défauts récurrents sur le site de production, il a été choisi, pour commencer, de s'intéresser à la propriété qui permet de qualifier l'écoulement du gaz au travers du sable de moulage, à savoir sa perméabilité. Cependant, pour éviter les inconvénients évoqués précédemment de la mesure sur échantillon (mesure non représentative du fait du décalage en temps et de la configuration de l'échantillon qui diffère de celle du moule), nous avons mis en œuvre une technique de mesure de cette grandeur directement

sur le moule prêt à recevoir le métal liquide. On attend donc de cette procédure une mesure plus fiable puisque effectuée in situ. Dans toutes les fonderies, la mesure de perméabilité s'effectue typiquement à l'aide d'un appareil de laboratoire, qui consiste soit à mesurer la pression en amont d'un échantillon de sable cylindrique normalisé, soit le temps que met un volume d'air donné à traverser cet échantillon maintenu dans un tube métallique. Dans la méthode proposée ici, on détermine la perméabilité à partir d'une mesure effectuée directement sur une empreinte dont l'épaisseur et la configuration géométrique peuvent être très variables. Avant de présenter la conception de l'appareil de mesure in situ, nous indiquons le principe de cette mesure et comment celle-ci peut être traduite en unité de perméabilité classique utilisée en fonderie.

Mesure de la perméabilité

Pour les mesures effectuées sur échantillon en laboratoire, les fondeurs utilisent généralement un perméamètre permettant de faire s'écouler un gaz (air) sous une charge constante et fournissant un indice de perméabilité P (souvent appelé indice de perméabilité GF) donné par

$$P = \frac{Vh}{Spt} \quad (2)$$

relation dans laquelle V est le volume d'air injecté (en cm^3), h est la longueur de l'échantillon (en cm), S sa section (en cm^2) p est la charge appliquée au gaz à l'entrée de l'échantillon (en cm de colonne d'eau) et t est le temps que met le volume d'air V pour s'écouler (en min). La mesure normalisée s'effectue avec les valeurs suivantes : $V = 2000 \text{ cm}^3$, $h = 5 \text{ cm}$, $S = 19.63 \text{ cm}^2$ sur un échantillon serré à trois coups de fouloir (recommandation technique du B.N.I.F. N° 432). Cette relation provient en réalité du modèle classique d'écoulement monodimensionnel d'un fluide isovolume (incompressible) dans un matériau poreux, bien connu sous le nom de loi de Darcy, qui s'écrit (Darcy, 1856)

$$\frac{Q}{A} = \frac{k \Delta p}{\mu L} \quad (3)$$

où Q désigne le débit de fluide de viscosité dynamique μ qui s'écoule dans le milieu de perméabilité k , de section A et de longueur L . Si toutes les quantités sont en unité SI, l'unité (SI) de k

est le m². Plus précisément, lorsque le fluide qui s'écoule est compressible, ce qui est le cas lors de la mesure avec un gaz, la relation (3) est modifiée et s'écrit :

$$\frac{Q}{A} = \frac{k}{\mu L} \frac{P_i^2 - P_o^2}{2P_o^2} \quad (4)$$

où P_i désigne la pression d'entrée du gaz, P_o sa pression de sortie (pression de l'atmosphère dans laquelle est plongée le milieu). Lorsque l'écart $P_i - P_o$ est petit devant P_o , on peut montrer, à l'aide d'un développement sur $(P_i - P_o)/P_o$ qu'au premier ordre, la relation (4) est identique à la relation (3), ce qui signifie que l'écoulement peut être considéré comme incompressible. Dans la pratique les sables de fonderie ont des perméabilités telles que cette condition de faible écart de pression est généralement réalisée de sorte que l'utilisation d'un modèle incompressible comme (2) ou (3) est justifié. L'identité entre les relations (2) et (3) est évidente en remarquant que, aux unités près,

$$Q = \frac{V}{t} \quad (5)$$

et que l'indice de perméabilité P n'est rien d'autre que

$$P = \frac{k}{\mu} \quad (6)$$

De manière plus précise, comme $V/t = 60 \times 10^6 Q$, $h = 10^2 L$, $S = 10^4 A$, $p = 1/98.1 \Delta p$ et que pour l'air à 20 °C, $\mu = 1.8 \times 10^{-5} Pa.s$, une relation explicite entre P et k peut facilement être déduite. Compte tenu de ces conversions, on obtient en effet immédiatement

$$k = \frac{1.8 \times 10^{-10}}{6 \times 98.1} P \approx 3.06 \times 10^{-13} P \quad (7)$$

La mesure de la perméabilité k d'un milieu poreux est couramment réalisée en injectant, au moyen d'une buse mise en contact de manière étanche avec la surface du milieu poreux comme représenté schématiquement sur la figure 2, un gaz sec et neutre (Goggin et al., 1988 ; Marie, 1999). L'analyse de l'écoulement tridimensionnel qui se développe permet d'établir une relation entre le débit d'air qui s'écoule et la pression d'injection du gaz à l'entrée.

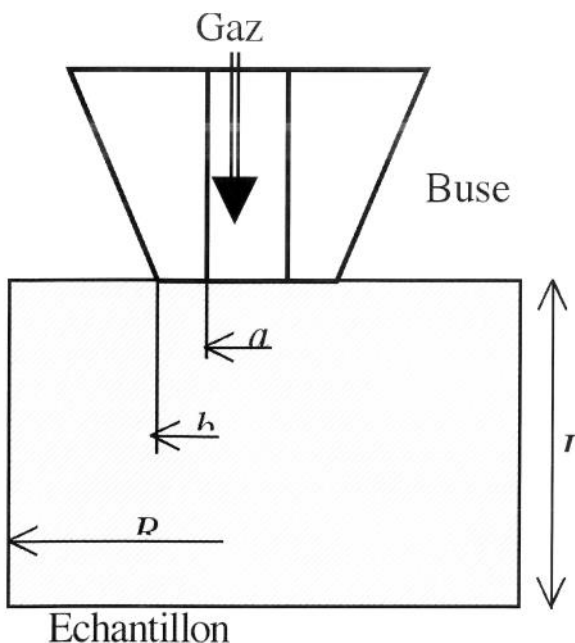


Figure 2 Schéma de principe de mesure de la perméabilité k .

La perméabilité k est alors donnée par

$$k = \frac{\mu Q P_i}{a G_o \left(\frac{P_i^2 - P_o^2}{2} \right)} \quad (8)$$

relation dans laquelle, comme dans (4), P_i est la pression d'entrée du gaz, P_o sa pression de sortie (pression de l'atmosphère dans laquelle est plongée le milieu) a est le rayon interne de la buse d'injection et comme dans (3), Q est le débit volume à l'entrée. Le coefficient G_o qui apparaît dans cette relation est un facteur de forme qui dépend de la configuration géométrique (i.e. a , b , R , et L , b étant le rayon externe de la buse, R le rayon du milieu sur lequel est effectué la mesure et L sa longueur). Les valeurs de ce facteur peuvent facilement être obtenues à l'aide d'abaques qui donnent G_o en fonction de $b_D = b/a$, $R_D = R/a$ et $L_D = L/a$. On remarquera que cette relation tient explicitement compte du caractère compressible du fluide injecté et que lorsque l'écart de pression $\Delta P = P_i - P_o$ est petit devant P_o , une forme quasi équivalente à (8) est, au premier ordre

$$k = \frac{\mu Q}{a G_o \Delta P} \quad (9)$$

Par contre, dans toutes les relations (2), (3), (4), (8), et (9), il n'est pas tenu compte d'éventuels effets inertiels ou de Klinkenberg. Les effets inertiels (non linéaires) de l'écoulement du gaz peuvent devenir significatifs lorsque le débit est tel que le nombre de Reynolds de l'écoulement à l'échelle du pore est supérieur à 0.1 ou 1. En revanche, les effets Klinkenberg, eux aussi non linéaires, sont une signature des chocs des molécules du gaz aux parois des pores, ce qui peut se manifester pour des mesures sur des milieux peu perméables pratiquées à faible pression (Carman, 1961).

Concrètement, et pour des questions de précision, la mesure s'effectue généralement en réalisant des injections à plusieurs valeurs de débits Q (ou de pression d'entrée P_i) de sorte que k est extraite de la pente de la régression linéaire issue du graphe $\mu Q P_i = f \left(a G_o \left(\frac{P_i^2 - P_o^2}{2} \right) \right)$ (en conservant le caractère compressible du gaz) comme représenté sur la figure 3.

La transposition de cette méthodologie au cas réel d'un moule défilant sur une chaîne de production n'est évidemment pas envisageable compte tenu du temps nécessaire de mesure. Pour cette raison, la mesure in situ peut-être effectuée, comme avec la technique sur perméamètre classiquement utilisé en laboratoire de fonderie, avec une seule valeur de débit.

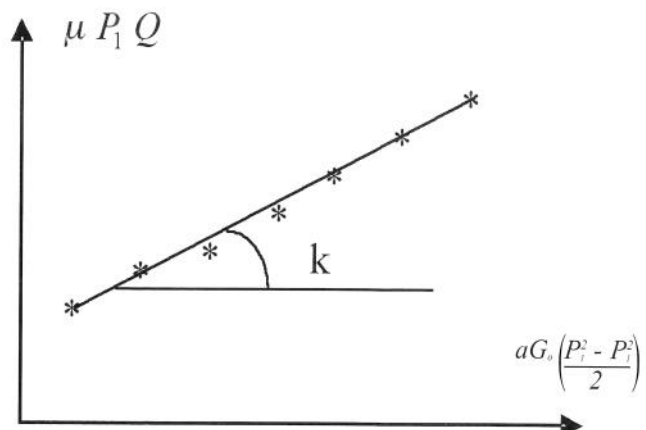


Figure 3 Détermination de k .

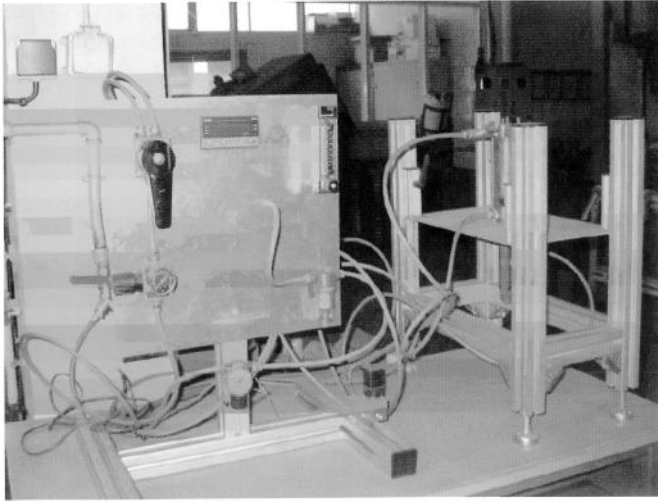


Figure 4 Prototype du dispositif de mesure.

Conception de l'appareil

Un prototype du dispositif de mesure de la perméabilité in situ, représenté sur la figure 4, a été réalisé (Coutzac et Peyrichout, 2002). Le schéma pneumatique de ce dispositif est représenté sur la figure 9. La buse d'injection est montée sur la tige d'un

vérin pneumatique la rendant escamotable grâce à un système de pilotage du vérin réglable en accord avec les cadences de mesure souhaitée et de défilement des moules. Par ailleurs, la pression dans la chambre du vérin permet de moduler la force d'appui de la buse à la surface de l'empreinte afin de réaliser une bonne étanchéité sans endommager l'empreinte.

Par commodité, le fluide retenu pour effectuer la mesure de perméabilité est également l'air comprimé servant à alimenter le vérin et prélevé sur le réseau de l'atelier de fabrication. Son degré hygrométrique pouvant varier, il est indispensable de prévoir un dispositif d'assèchement. La pression d'entrée de l'air est mesurée en amont de la buse à l'aide d'un capteur de pression différentiel. Celle-ci peut-être ajustée en fonction de la perméabilité à mesurer à l'aide d'un régulateur de manière à ce que le signal de pression soit le plus significatif dans la gamme du capteur utilisé et ce tout en conservant un débit compatible avec la gamme du débitmètre utilisé.

Exemple de mesure et validation

Afin de valider la démarche envisagée, nous avons réalisé un ensemble de huit échantillons de rayon $R = 50$ mm et de longueur $L = 50$ mm en sable silico-argileux dont nous avons fait varier le

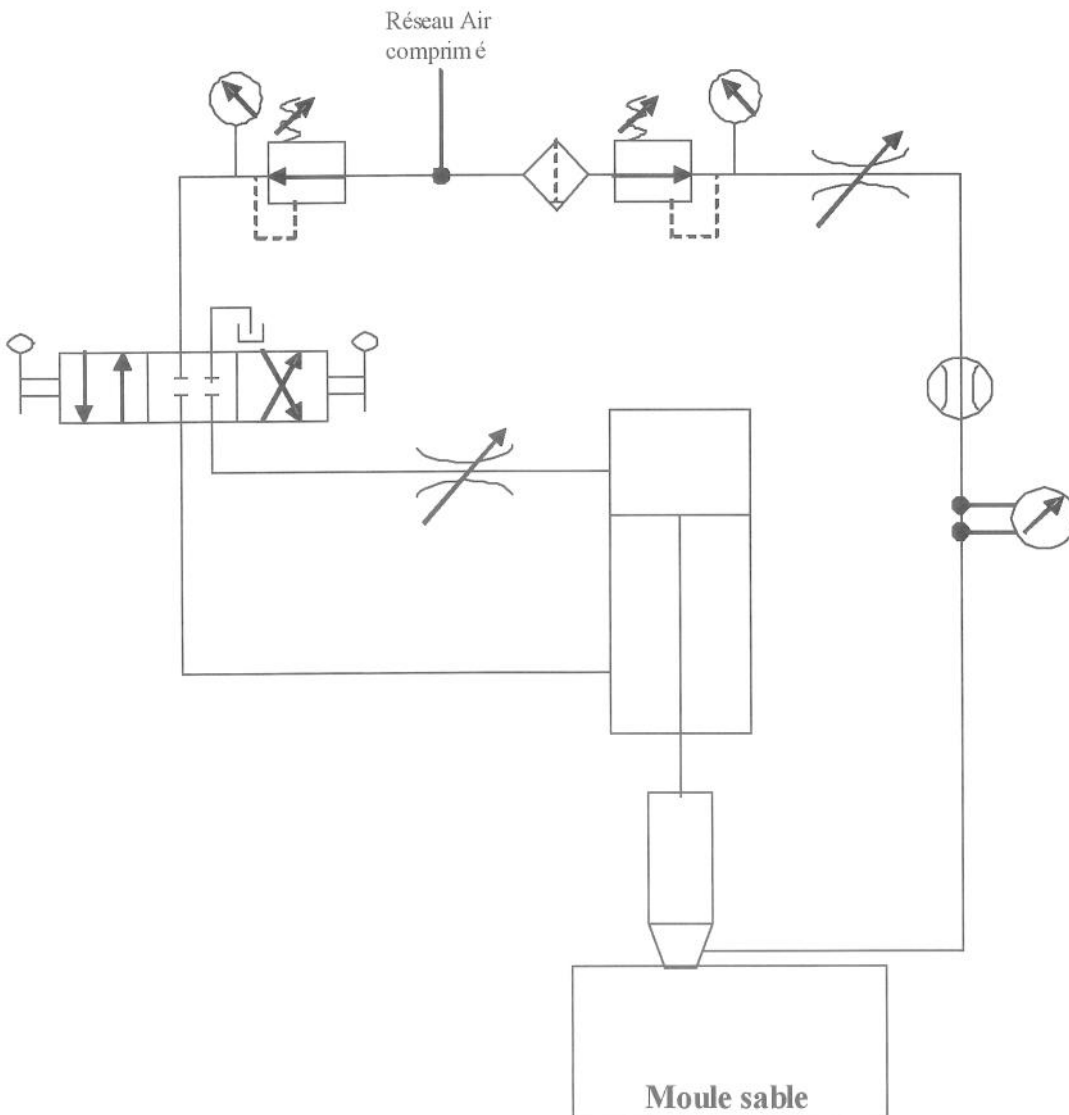


Figure 5 Schéma pneumatique du dispositif prototype de mesure de la perméabilité in-situ.

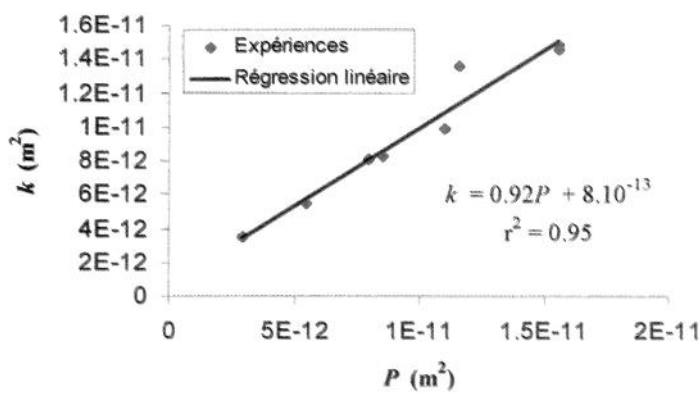


Figure 6 Résultats de k en fonction de P . Mesures sur huit échantillons.

serrage (entre 5 et 44 coups de fouloir). Sur ces huit échantillons, la perméabilité k a été mesurée au di-azote en utilisant un dispositif comme décrit sur la figure 2 avec une buse dont les caractéristiques sont $a = 2,5$ mm et $b = 6$ mm, ce qui donne $G_0 = 4.84$. Les mesures ont été réalisées avec un débit de gaz fixe, Q , de 2 ln/min (conditions normales), l'échantillon étant placé à l'atmosphère ($P_0 \approx 101300$ Pa), ce qui conduit à une différence de pression $P_1 - P_0$ variant de 3000 à 15000 Pa. Compte tenu de cette dernière valeur qui n'est que d'un ordre de grandeur plus petit que P_0 , nous avons conservé le modèle d'écoulement compressible (8) pour interpréter les résultats de mesure de P_1 et Q et trouver k . Sur ces mêmes échantillons, les mesures de P ont été réalisées sur un perméamètre GF de laboratoire de fonderie. Afin d'établir une comparaison directe avec k , l'indice de perméabilité P obtenu a été converti en m^2 en utilisant la relation (7). Cette comparaison entre P et k est présentée sur la figure 6, et montre, comme attendu, que les résultats s'organisent bien autour de la première bissectrice, avec un bon coefficient de corrélation, confirmant de ce fait la validité de l'approche.

Pour faciliter la mise en place de cette démarche consistant, en milieu industriel, à déterminer k in situ à l'aide d'une mesure du couple (Q, P_1), il peut être intéressant de pousser l'analyse de la relation (8) pour en simplifier l'utilisation pratique. Pour ce faire, on retient la contrainte selon laquelle la mesure est effectuée avec une différence de pression $\Delta P = P_1 - P_0$ qui reste petite devant P_0 comme évoqué précédemment. On rappelle que ΔP est la quantité directement mesurée dans le dispositif prototype mis en place. Dans ce contexte, l'expression de k tirée de (8)

$$k = \frac{\mu Q}{aG_0 \varepsilon P_0} \frac{1 + \varepsilon}{1 + \varepsilon/2} \quad (10)$$

où l'on note

$$\varepsilon = \frac{\Delta P}{P_0} \quad (11)$$

peut être développée au premier ordre en ε pour obtenir une approximation simple de k

$$k = \frac{\mu Q}{aG_0} \left(\frac{1}{\Delta P} + \frac{1}{2P_0} \right) \quad (12)$$

Ce dernier résultat présente l'avantage de relier linéairement k à $1/\Delta P$ qui est une quantité directement mesurée, ce qui simplifie beaucoup l'interprétation pratique de la mesure. En définitive, la combinaison de la relation (7) validée précédemment et de la

relation (12) permet, à partir de la seule lecture de ΔP , à condition que cette quantité reste petite devant la pression atmosphérique P_0 , de déterminer P , indice de perméabilité classiquement utilisée dans le milieu industriel de la fonderie

$$k = 3.27 \times 10^{12} \frac{\mu Q}{aG_0} \left(\frac{1}{\Delta P} + \frac{1}{2P_0} \right) \quad (13)$$

Pour illustrer l'utilisation de cette technique, nous avons préparé cinq sables silico-argileux résultant tous d'une malaxée de 50 kg. La composition de ces sables est reportée dans la table 1 ou E, B et N désignent encore respectivement la teneur en eau, la teneur en bentonite et la teneur en noir minéral.

Chacun de ces sables a été utilisé pour constituer un moule avec un serrage identique ainsi qu'un échantillon serré à trois coups de fouloir servant à mesurer P à l'aide d'un perméamètre GF de laboratoire de fonderie. Le prototype, tel que décrit sur la figure 5, a ensuite été utilisé pour mesurer ΔP résultant d'un débit, Q , de 5,5 ln/min (conditions normales) sur chaque moule et ce en cinq points différents tel que représenté sur la figure 7.

	Sable 1	Sable 2	Sable 3	Sable 4	Sable 5
E %	2	2	3	4	4
B %	4	5	5	7	6
N %	2	4	5	3	7

Tableau 1. Caractéristiques des cinq sables utilisés pour la détermination de P à partir de la mesure de ΔP .

Les résultats de ces mesures sont rassemblés dans le tableau 2, indiquant que ΔP reste toujours petit devant P_0 . Les indices 1 à 5 désignent les points de mesures repérés sur la figure 7 et ΔP_{moy} représente la moyenne sur les cinq points de mesure.

Comme le confirme la figure 8, sur laquelle nous avons représenté P (exprimé en indice GF) en fonction de $1/\Delta P_{moy}$, on identifie bien une relation linéaire entre ces deux quantités et ce avec un excellent coefficient de corrélation confirmant l'intérêt de la méthode pour une application sur site industriel.

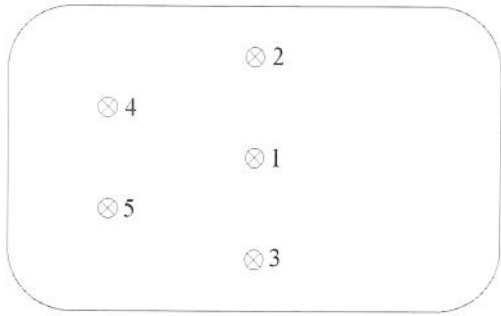


Figure 7. Position des points de mesure de ΔP sur le moule.

La représentation de la figure 8 constitue une courbe maîtresse qui pourrait ensuite être utilisée pour identifier, à partir de la mesure de ΔP sur un moule constitué d'un sable de composition différente mais ayant le même serrage, l'indice de perméabilité P . Pour compléter la procédure et intégrer le paramètre serrage, il conviendrait de répéter l'étape d'identification de la courbe maîtresse correspondant à toute autre valeur de serrage pour finalement identifier P en fonction du serrage, de E, B et N . Bien enten-

Sable	P (GF)	ΔP_1 (mbar)	ΔP_2 (mbar)	ΔP_3 (mbar)	ΔP_4 (mbar)	ΔP_5 (mbar)	ΔP_{moy} (mbar)
1	178	7	6	5	7	8	6.6
2	118	16	17	18	15	16	16.4
3	115	17	20	19	18	16	18
4	140	10	9	11	10	8	9.6
5	90	40	39	38	41	38	39.2

Tableau 2. Résultats des mesures effectuées sur cinq sables différents serrés en moule. P est mesuré sur échantillons serrés à trois coups de fouloir.

du, une alternative à cette dernière procédure, envisageable sur site industriel, est d'avoir au préalable identifié, par exemple à l'aide d'un plan d'expériences comme décrit au paragraphe 2, les relations liant P à tous les paramètres pertinents influant sur P .

Conclusion

La perméabilité est souvent un paramètre déterminant dans la qualité des pièces moulées en moule sable car elle détermine l'aptitude du sable à laisser s'échapper le gaz à la coulée conditionnant de ce fait le transfert de la chaleur. La mesure et le suivi de ce paramètre en production est souvent décalé car pratiqué en laboratoire sur des échantillons qui ne sont pas nécessairement représentatifs des moules sur la chaîne de production. Nous avons présenté ici une technique de mesure et une méthode d'interprétation de la mesure de la perméabilité in situ, c'est-à-dire directement sur le moule défilant juste avant la coulée. La démarche proposée, étayée par des rappels simples sur la physique mise en jeu, a été validée par des mesures sur échantillons et sur moules de sable silico-argileux. Les avantages liés à la méthode présentée ici sont nombreux : I) la mesure est effectuée in situ, elle est donc représentative et permet un contrôle qualité direct ; II) la fréquence de mesure peut être adaptée à la cadence de production ; III) la mesure peut être localisée en des points sensibles du moule du point de vue de la qualité des pièces ; IV) la mesure est simple à interpréter en terme de perméabilité et d'indice GF couramment utilisé dans le métier de la fonderie ; V) le dispositif est simple à mettre en œuvre et peu onéreux.

Remerciements

Nous tenons à remercier tout particulièrement l'entreprise SADEF du groupe VALFOND (NDR : devenue depuis, FUMEL TECHNOLOGIE) pour leur soutien ainsi que Cyril Caubit, Laurent Dubedout, Cécile Coutzac et Benoit Peyrichout qui ont très largement contribué à ce travail.

Références

Baier, J. et Köppen, M., 1994, Manuel des défauts de fonderie dus au sable de moulage et leurs remèdes, IKO, Erbslöh.

Carman, P.C., 1961, L'écoulement des gaz à travers les milieux poreux, Bibliothèque des Sciences et Techniques Nucléaires, INSTN, Saclay et PUF (Paris).

Caubit, C. et Dubedout, L., 2001, Analyse des propriétés du sable de moulage et noyautage en relation avec les conditions de préparation, Rapport de PFE ENSAM.

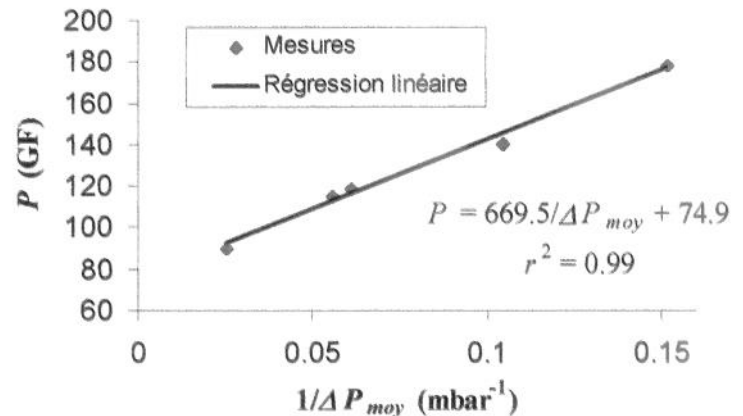


Figure 8. P (mesuré sur les échantillons) en fonction de $1/\Delta P_{moy}$ mesuré sur les moules.

Coutzac, C. et Peyrichout, B., 2002, Mesure de la perméabilité en moule sable, Rapport de PFE ENSAM.

C.T.I.F., 1989, Recueil des recommandations techniques sur les contrôles des sables de fonderie, Editions Techniques des Industries de la Fonderie.

Darcy, H., 1856, Les fontaines publiques de la ville de Dijon, Editions Dalmont, Paris.

Goggin, D.J., Thrasher, R. and Lake, L.W., 1988, A theoretical and experimental analysis of minipermeameter response including gas slippage and high velocity effects, In Situ, 1279-116.

Goupy, J., 1996, La méthode des plans d'expériences. Optimisation du choix des essais et de l'interprétation des résultats, Bordas, Paris.

Marie, C., 1999, Simulation de mesures de perméabilité par minipermeamètre en milieu poreux, Rapport de DEA, INP Toulouse.

Rochier, M., 1989, Principaux défauts imputables aux sables à vert en fonderie de fonte, brochure CTIF.

Contact

Didier LASSEUX - TREFLE (UMR CNRS 8508)

Site ENSAM - Esplanade des Arts et Métiers

33405 Talence Cedex, France

Email : lasseux@lept-ensam.u-bordeaux.fr

Tel : (33) 556 845 403 - Fax : (33) 556 845 401