



HAL
open science

LOI DE COMPORTEMENT D'UN FILM CHAUD EN RÉGIME QUASI-ISOTHERME

Jean-Claude Magenheim

► **To cite this version:**

Jean-Claude Magenheim. LOI DE COMPORTEMENT D'UN FILM CHAUD EN RÉGIME QUASI-ISOTHERME. Vie et Milieu / Life & Environment, 1980, 30, pp.29 - 33. hal-03007859

HAL Id: hal-03007859

<https://hal.sorbonne-universite.fr/hal-03007859v1>

Submitted on 16 Nov 2020

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.

LOI DE COMPORTEMENT D'UN FILM CHAUD EN RÉGIME QUASI-ISOTHERME

Jean-Claude MAGENHAM

Laboratoire d'Océanographie Physique du Muséum,
43, rue Cuvier, 75231 Paris Cedex 05

FILM CHAUD
LOI DE COMPORTEMENT
NUTRITION
TAUX DE POMPAGE
MESURES

HOT FILM
COOLING LAW
FEEDING
PUMPING RATE
MEASUREMENTS

RÉSUMÉ. – Les lois de refroidissement pour les courantomètres à film chaud sont passées en revue et quelques résultats présentés. En biologie ces capteurs sont généralement utilisés dans un domaine étroit de température. Une loi de comportement très simplifiée, qui fournit cependant des résultats précis, est proposée pour ce type d'usage.

ABSTRACT. – The cooling laws for hot-film anemometers are considered, and some results are presented. Biologists use these sensors mostly on a narrow temperature range. A rather simple law is submitted for these conditions. It fits well the calibration results.

De par ses qualités (très faibles dimensions du capteur, excellente réponse aux hautes fréquences), la méthode d'anémométrie-courantométrie par sondes chauffées s'est imposée comme un outil universel en mécanique de la turbulence. Les progrès technologiques (sondes à film chaud quartzées) et les travaux récents permettent leur utilisation en milieu marin par des non spécialistes.

En biologie marine, cette technique s'avère ainsi précieuse pour mesurer directement le taux de pompage d'organismes filtreurs (Amouroux, Revault D'Allonnes & Rouault, 1975; Fiala-Medioni, 1976 – des méthodes utilisées antérieurement sont présentées, par exemple, dans Mc Cammon, 1965 et Reiswig, 1971).

L'obtention de mesures précises suppose cependant soit des étalonnages fréquents (à chaque changement des conditions expérimentales), soit l'utilisation de lois de comportement complexes. Nous présentons donc, ci-dessous, outre ces lois classiques et quelques exemples de leur application, une formule très simplifiée qui donne, dans un domaine d'utilisation évidemment plus restreint, des résultats aussi précis.

GÉNÉRALITÉS SUR LE FILM CHAUD

Les capteurs sont formés par dépôt sous vide, sur un support de quartz, d'un film mince de métal (d'une épaisseur de l'ordre de $0,1 \mu$). Ce film constitue ainsi une résistance qui est portée par effet Joule à une température supérieure à celle du milieu ambiant. Le transfert thermique vers ce dernier, et donc l'énergie dissipée par le film, sont fonction des propriétés du fluide, de l'écart de température entre celui-ci et l'élément sensible et de leur vitesse relative.

Les sondes utilisées ici (fig. 1) sont coniques. Une fine couche de quartz (épaisseur 2μ) assure une protection contre les effets électrochimiques en milieu conducteur. En fonctionnement, l'élément sensible est maintenu à résistance et donc à température fixe par insertion dans un pont de Wheastone qu'un amplificateur asservi maintient en équilibre.

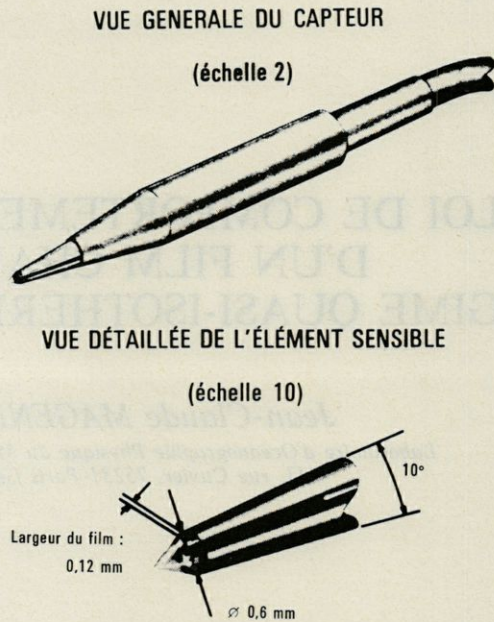


Fig. 1. - Sonde à film chaud conique (DISA, modèle 55 R 42).

Conical hot film probe (DISA 55 R 42 model).

LOIS DE COMPORTEMENT D'UN FILM CHAUD CONIQUE

Le transfert de chaleur vers le fluide se décrit en faisant intervenir divers nombres adimensionnels : nombres de Reynolds (Re), de Nusselt (Nu), de Prandtl (Pr) pour le calcul desquels les propriétés du fluide sont prises à la température θ_f , dite température « de film », qui est la moyenne des températures du fluide θ_∞ et de l'élément sensible θ_w :

$Re = V.l/\nu_f$ $Nu = W/[K_f.l(\theta_w - \theta_\infty)]$ $Pr = c_p.\nu_f/K_f$
(V , vitesse; ν_f , K_f , c_p , respectivement viscosité, conductivité thermique et chaleur spécifique du fluide à θ_f ; l , dimension caractéristique du capteur; W , puissance dissipée dans le film).

Les lois qui régissent ce transfert pour les sondes à film chaud ont été déduites de celles qui décrivent le comportement des fils chauds (mesures dans l'air - cf., par exemple, Hinze, 1959), connues depuis plus longtemps.

Pour des sondes coniques, dans le cas d'un écoulement isotherme et pour une température de capteur donnée, Resch (1968), de même que Morrow et Kline (1971) proposent une loi semblable à celle de King :

$$Nu = A + B.Re^n$$

où l'exposant n (0,5 pour les fils) et les constantes A et B sont déterminés expérimentalement.

Dans le cas général, Ezraty (1970) part, entre autres, des lois de Kramer et de Collis et Williams (1959),

introduisant les pertes de chaleur vers le support sur lequel le film est déposé :

$$Nu = A.K_s/K_f + B.Pr^\alpha + C.Pr^\beta.Re^n \text{ (type Kramer);}$$

$$Nu = A.K_s/K_f + (B + C.Re^n) (\theta_f/\theta_\infty)^m \text{ (type Collis et Williams).}$$

Le premier terme, commun à ces deux expressions, représente le transfert au support dont la conductivité thermique est K_s à la température θ_∞ .

Ezraty a ainsi montré que, dans l'eau, dans la gamme 0,6 à 3,3 m/s les meilleurs résultats sont obtenus avec la loi type Collis et Williams. Bonis et Van Thinh (1973), utilisant une loi du type Kramer entre 0,05 et 1 m/s (domaine qui nous intéresse ici), obtiennent un bon ajustement avec leurs données; aussi avons-nous vérifié, pour ces vitesses, la validité des travaux d'Ezraty.

Les coefficients et exposants de ces lois dépendent de la géométrie du capteur et varient donc d'une sonde à l'autre. La loi de refroidissement de chaque film doit donc être déterminée par étalonnage préalable. Bien que celui-ci soit effectué en eau douce, l'application de la loi de comportement ainsi obtenue à des mesures en eau de mer ne soulève aucun problème, la salinité n'ayant pas d'incidence sur la réponse des capteurs (Revault d'Allonnes, 1970).

ÉTALONNAGES, RÉSULTATS

Diverses méthodes sont utilisées pour étalonner les films chauds en vitesse : soufflerie à eau, jet libre, remorquage par un bras tournant ou en ligne droite. C'est cette dernière méthode, simple à mettre en œuvre, qui est utilisée ici.

L'installation comporte : un canal d'expérimentation placé dans une salle thermostatée, un chariot portesonde, un dispositif tracteur formé d'un disque lesté tombant à l'intérieur d'un tube rempli d'eau, le frottement fluide assurant la régulation de vitesse. Celle-ci peut varier entre 3 et 60 cm/s. Elle est déterminée en mesurant, avec un chrono-fréquences-mètre, le temps que met le chariot pour parcourir, à la vitesse limite du système, la distance séparant deux contacts. Un enregistreur graphique saisit la tension de sortie de l'anémomètre. On peut ainsi vérifier que la vitesse limite est effectivement atteinte (et donc constante) dans la zone de mesure.

Les données (1) de l'étalonnage (multiplets vitesse, températures de l'eau et du film, tension de sortie) sont alors traitées sur ordinateur pour obtenir la loi de comportement, les nombres adimensionnels, calculés en machine, servant d'intermédiaires.

Pour chaque série isotherme de données, la loi de type King est déterminée en calculant, pour diverses

(1) Celles correspondant aux résultats ici présentés nous ont été communiquées par A. Fiala (Laboratoire Arago).

valeurs de n , les coefficients A et B (méthode des moindres carrés). On choisit alors la valeur de l'exposant pour laquelle la valeur quadratique moyenne des écarts entre la valeur expérimentale du nombre de Nusselt et celle calculée selon la loi est minimale. Cette erreur résiduelle est rapportée à la valeur moyenne des nombres de Nusselt expérimentaux.

Pour une vingtaine de séries, correspondant à cinq sondes du même type (DISA 55R42), les résultats obtenus sont les suivants :

- l'exposant n varie entre 0,130 et 0,145, sauf pour une sonde, qui donne des valeurs proches de 0,100. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles obtenues avec un autre modèle de films coniques (marque TSI), tant par Morrow et Kline (5 à 25 cm/s) que par nous-même (10 à 100 cm/s);
- l'erreur r m s est, en moyenne, de 0,8 %, les résultats se répartissant à peu près régulièrement entre 0,4 et 1,3 %. Ces valeurs représentent l'erreur instrumentale d'une part, l'incertitude liée à la régulation de vitesse d'autre part. Cette dernière est mise en évidence par la différence de dispersion entre les basses et les hautes vitesses qui résulte de l'usage de deux géométries de disque frein (Fig. 3 a, courbe 1).

La loi de Collis et Williams est déterminée de façon semblable : les coefficients A , B et C sont calculés par moindres carrés pour divers couples (n , m). La recherche du couple optimal s'effectue sur l'erreur résiduelle définie précédemment. L'exposant n ne prend que quelques valeurs, choisies d'après les résultats du traitement précédent (séries isothermes).

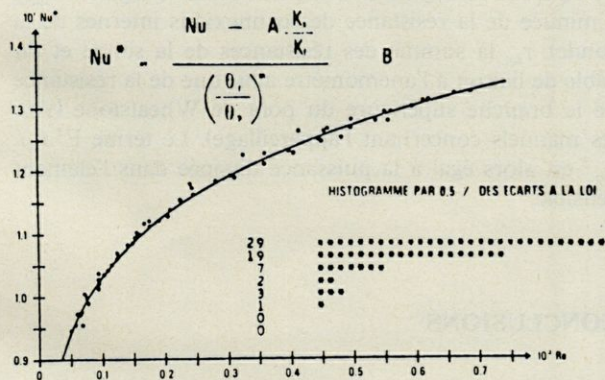


Fig. 2. - Loi de Collis et Williams avec conduction au support, étalonnage sur une gamme large de températures (sonde M).

Law of Collis and Williams with conduction to the support, calibration on a wide range of temperature (probe M).

$$Nu = A \cdot K_s / K_f + (B + C \cdot Re^n) (\theta_f / \theta_w)^m$$

$\theta_w = 9,3$ à $22,5$ °C - $V = 5$ à 55 cm/s
 $n = 0,130$ $m = -0,13$ $A = -0,25 \cdot 10^{-1}$
 $B = 0,16 \cdot 10^{-1}$ $C = 0,57 \cdot 10^{-2}$

L'histogramme représente, sur chaque ligne, le nombre de points pour lesquels l'écart entre la valeur calculée et celle effectivement observée du nombre de Nusselt est compris, successivement, entre 0 et 0,5 %, 0,5 et 1 %, etc.

La loi présentée en exemple (Fig. 2) regroupe les données obtenues, pour une sonde, dans la gamme : $V = 5$ à 60 cm/s ; $\theta_w = 9,5$ à $22,5$ °C ; $\theta_f / \theta_w = 1,4$ à $1,95$ (4 températures de fluide avec une seule surchauffe dans chaque cas). L'erreur résiduelle typique est de 1 % ; celle relevée pour les lois isothermes correspondantes est de 0,8 % ; l'écart est attribuable à l'incertitude sur le terme $\theta_w - \theta_w$ du nombre de Nusselt, incertitude qui n'apparaît pas lors du calcul des lois du type King.

RECHERCHE D'UNE LOI POUR UN ÉCOULEMENT QUASI-ISOTHERME

En biologie, de nombreux travaux (étude de l'influence de divers paramètres physiques, par exemple) sont menés à température constante. Celle-ci cependant varie, tant au cours d'une même expérience que d'une expérience à l'autre, autour d'une valeur de référence. Il faut donc, soit utiliser des lois de type King, ce qui impose de calibrer systématiquement les sondes en assurant l'égalité des températures des bacs d'expérimentation et d'étalonnage, soit avoir recours à la loi type Collis et Williams. Cette dernière représente une grosse sujétion tant pour le calcul des résultats que par les impératifs de l'étalonnage (précision, grand nombre de points, grands intervalles de températures).

Une loi simplifiée a donc été recherchée qui rend compte de variations inférieures à 2 °C autour de la température nominale du fluide, ainsi que de variations équivalentes de la température du capteur. Elle peut être obtenue par linéarisation du facteur qui, dans la loi de Collis et Williams :

$$Nu = (A + B \cdot Re^n) \cdot (\theta_f / \theta_w)^m$$

rend compte de l'influence de la température. En posant $R = \theta_f / \theta_w$, nous aboutissons à la loi suivante :

$$Nu = (A + B \cdot Re^n) \cdot [1 + C \cdot (R - R_0)]$$

où R_0 est la valeur de référence. Les coefficients C et B sont déterminés à partir des variations selon R du coefficient B de la loi de type King : le terme en $B \cdot Re^n$ est prépondérant ($B \cdot Re^n / A$ est, à 5 cm/s, de l'ordre de 10^2). Le terme constant, A , est obtenu en minimisant l'erreur résiduelle.

L'exemple présenté sur la figure 3 montre que les résultats ainsi obtenus sont précis. Les données correspondantes présentent des intervalles de 2 °C en θ_w , 3 °C en θ_w , 0,05 en R (autour de $R_0 = 1,6$). L'erreur résiduelle, de l'ordre de 1,7 %, est légèrement supérieure à celle que donne la loi du type Collis et Williams. Les histogrammes des figures 3 b et 3 c, que l'on comparera utilement à celui de la figure 2, montrent plus précisément la façon dont ces lois s'ajustent aux données expérimentales. En dehors de quelques points qui s'écartent, aux faibles vitesses, de 4 à 5 % (2 à 3 % avec la loi classique), le résultat est satisfaisant.

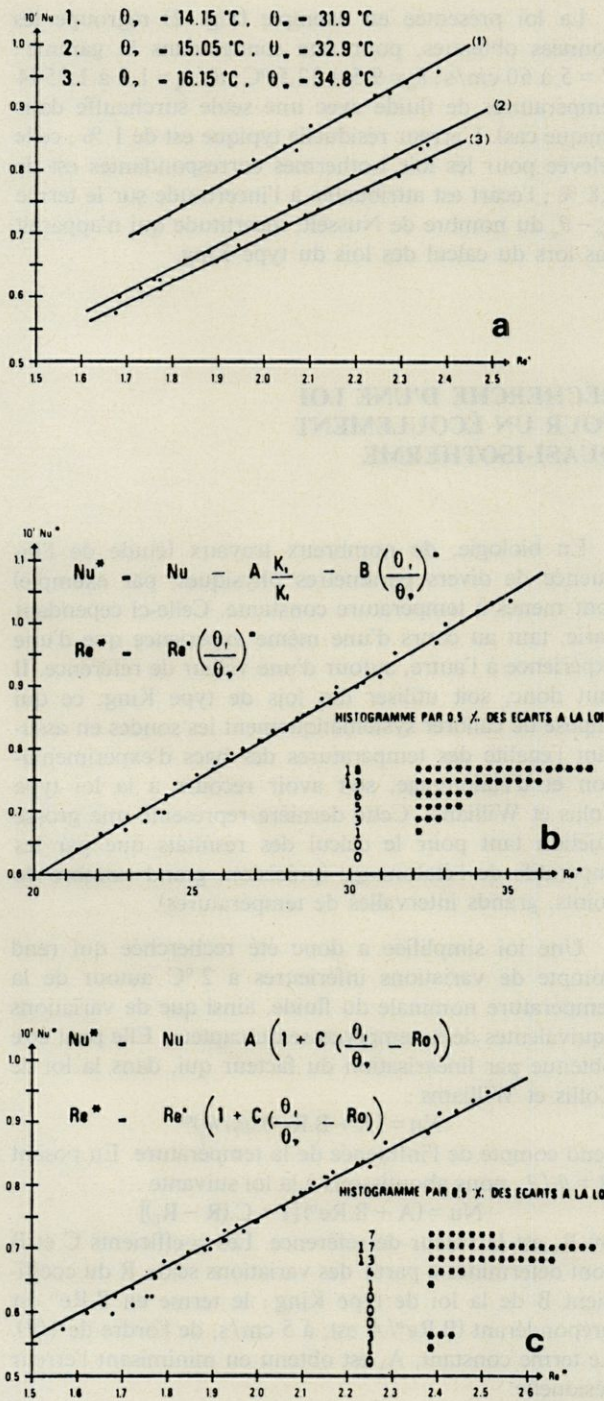


Fig. 3. - Comparaison des ajustements obtenus pour divers types de lois appliqués à l'étalonnage d'une sonde sur une gamme étroite de température (sonde K). a) lois de type King sur des séries isothermes; b) loi de Collis et Williams avec conduction au support; c) loi de Collis et Williams linéarisée en température. $Nu = (A + B.Re^n) (1 + C (\theta_s/\theta_w - R_0))$.
 Comparison of the adjustments obtained for different types of law applied to the calibration of a probe on a narrow band of temperatures (probe K). a : laws of King type on isothermic series; b : law of Collis and Williams with conduction to the support; c : law of Collis and Williams.
 $Nu = (A + B.Re^n) (1 + C (\theta_s/\theta_w - R_0))$.

UTILISATION DE LA RELATION PROPOSÉE

L'étalonnage des sondes et le traitement numérique des données ci-dessus décrits fournissent, pour chaque sonde : n, A, B, C, R₀ coefficients de la loi et l longueur caractéristique du film.

Pour chaque expérience, on choisit une température de sonde (θ_w) comprise entre 40 et 60 °C selon la sensibilité recherchée et la température du fluide. La valeur de la résistance à afficher sur l'anémomètre se déduit alors de la courbe expérimentale donnant r_{sonde} en fonction de la température.

Lors de l'expérience proprement dite, la tension aux bornes de l'anémomètre (E) et la température de fluide (θ_ϕ) sont mesurées simultanément.

On peut alors calculer la viscosité (ν_f) et la conductivité thermique (K_f) prises à la température de film ($\theta_f = (\theta_w + \theta_\phi)/2$). Ce calcul sera fait soit à partir de tables (Ezraty), soit à l'aide de formules (Bonis & Van Thinh).

La vitesse recherchée se déduit alors de la loi proposée soit en suivant les diverses étapes exposées plus haut, soit, ce qui revient au même, en utilisant la formule globale développée ci-dessous :

$$V = \left\{ \frac{E^2.r_w}{r_{tot}^2} \times \frac{1}{Kf.l.(\theta_w - \theta_\phi)} \times \frac{1}{1 + C.(R - R_0)} \right\}^{-A} \frac{1}{n} \times \nu_f/l$$

où r_w est la résistance de l'élément sensible (égale à r_{sonde} diminuée de la résistance des connexions internes de la sonde), r_{tot} la somme des résistances de la sonde et du câble de liaison à l'anémomètre ainsi que de la résistance de la branche supérieure du pont de Wheatstone (voir les manuels concernant l'appareillage). Le terme E².r_w/r_{tot}² est alors égal à la puissance dissipée dans l'élément sensible.

CONCLUSIONS

La loi ici proposée répond donc à un double projet : simplification des calculs de détermination et d'application de la loi qui deviennent ainsi aisément réalisables sur un petit calculateur ; réduction des contraintes d'étalonnage dont les conditions se rapprochent désormais de celles des mesures proprement dites.

Il va cependant de soi que les lois ainsi obtenues ne permettent de décrire le comportement des sondes que dans le domaine (voisinage de $\theta_{\phi 0}$ et $\theta_{w 0}$) fixé par ces conditions d'étalonnage et non dans le domaine, plus large, que définit la condition R voisin de R₀.

La précision ainsi obtenue, de l'ordre de 2 %, semble suffisante pour de nombreux usages.

BIBLIOGRAPHIE

- AMOUROUX J. M., M. REVAULT D'ALLONNES & C. ROUAULT, 1975. - Sur la mesure directe du débit de filtration chez les Mollusques lamelibranches. *Vie et Milieu*, **25** (2B): 339-346.
- BONIS M. & N. VAN THINH, 1973. - A heat transfer law for a conical hot-film probe in water. *DISA Inf.*, **14**: 11-14. Herlev, Danemark.
- COLLIS D. C. & M. J. WILLIAMS, 1959. - Two-dimensional convection from heated wires at low Reynolds numbers. *J. Fluid Mech.*, **6**: 357-384.
- EZRATY R., 1970. - Sur la mesure de caractéristiques turbulentes dans les écoulements d'eau. *Thèse 3^e cycle, Univ. Aix-Marseille*, 18 p.
- FIALA-MEDIONI A., 1976. - Filter feeding ethology of benthic invertebrates (*Asciadiacea*). III Recording of water current *in-situ*. Rate and rhythm of pumping. *Mar. Biol.*, **45**: 185-190.
- HINZE J. O., 1959. - Turbulence. Londres, Mac Graw Hill, 586 p.
- MC CAMMON H. M., 1965. - Filtering currents in brachiopods measured with a thermistor flowmeter, *in*: "Ocean science and ocean engineering". Trans. joint conf. exhibit, Washington 14-17 juin 1965, **2**: 772-779.
- MORROW T. B. & S. J. KLINE, 1971. - The evaluation and use of hot-wire and hot-film anemometers in liquids. Stanford Univ., Dep. Mech. Eng. Rep. MD 25. Stanford, Cal., 180 p.
- REISWIG H. M., 1971. - In situ pumping activities of tropical *demospongiae*. *Mar. Biol.*, **9** (1): 38-50.
- RESCH F., 1968. - Études sur le fil chaud et le film chaud dans l'eau. *Thèse 3^e cycle, Univ. Aix-Marseille*, 67 p.
- REVAULT D'ALLONNES M., 1970. - Étude et mise au point des méthodes de mesure au film chaud de la turbulence dans l'eau de mer. *Thèse 3^e cycle, Fac. Sci. Paris*, 65 p.

Accepté le 19 février 1979.