

Microfiltration tangentielle des boissons

Influence des caractéristiques hydrodynamiques

par

Martine MIETTON-PEUCHOT, V. MILISIC
et R. BEN AIM

Résumé

La microfiltration tangentielle utilisée dans le cas de la bière et du vin présente du point de vue des débits de filtrat des avantages par rapport à la filtration transversale.

Pour mieux comprendre l'influence de l'écoulement tangentiel sur la formation du dépôt, les résultats obtenus par le calcul au moyen des lois classiques de la filtration et d'un modèle hydrodynamique plus développé sont confrontés aux résultats des mesures.

L'écart observé indique qu'aux forces hydrodynamiques, dans le cas de la filtration des boissons, il faut ajouter l'influence des forces de nature physico-chimiques.

Mots clés : Boissons - Bière - Vin - Microfiltration tangentielle - Ecoulement tangentiel - Formation du dépôt - Modélisation.

Summary

CROSS-FLOW MICROFILTRATION OF BEVERAGES
Influence of hydrodynamic characteristics

The cross-flow microfiltration of beer and wine shows the advantages over dead-end filtration in filtrate permeation rates.

The results calculated on the basis of the chemical filtration laws and a newly developed hydrodynamic model are compared to the

experimental data in order to determine the influence of cross-flow on deposit formation.

The discrepancy which are observed points out that, in filtration of beverages, the influence of the electro-chemical forces should be considered together with the hydrodynamics.

Key words: Beverage - Beer - Wine - Cross-flow microfiltration - Cross-flow - Deposit formation - Modelling.

I. INTRODUCTION

La filtration transversale classique des boissons (filtration sur précouches, plaques ou membranes) conduit à la formation d'un gâteau augmentant de façon importante la résistance hydraulique à la filtration. Un écoulement tangentiel à la surface du milieu filtrant permet de limiter la croissance du dépôt et d'améliorer ainsi, les débits de filtrat.

La vitesse de l'écoulement tangentiel est supposée jouer un rôle prépondérant dans le mécanisme de formation du dépôt et de colmatage du média-filtrant.

L'influence des caractéristiques hydrodynamiques de l'écoulement tangentiel est étudiée à l'aide des lois classiques de la filtration et d'un modèle mathématique dont l'ajustement est assuré par des essais de filtration sur de la bière et du vin.

II. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les essais expérimentaux ont été effectués sur des pilotes conçus à l'Institut de la Filtration et des Techniques Séparatives. Les conditions d'entrée et de sortie de la cellule de filtration tangentielle ont été parfaitement définies afin d'obtenir un régime établi dès l'entrée de la cellule.

Le milieu filtrant choisi est une membrane en polycarbonate Nucléopore de $0.2 \mu\text{m}$ qui présente l'avantage d'être facilement caractérisable en raison de ses pores cylindriques monodimensionnels et de pouvoir limiter les phénomènes de colmatage dans la masse en raison de sa faible épaisseur ($\approx 10 \mu\text{m}$).

Les essais ont porté sur la microfiltration tangentielle terminale de deux boissons :

- la bière soutirée en fin de garde ;
- le vin soutiré après collage.

Un exemple des mesures effectuées est présenté sur les figures 1 et 2.

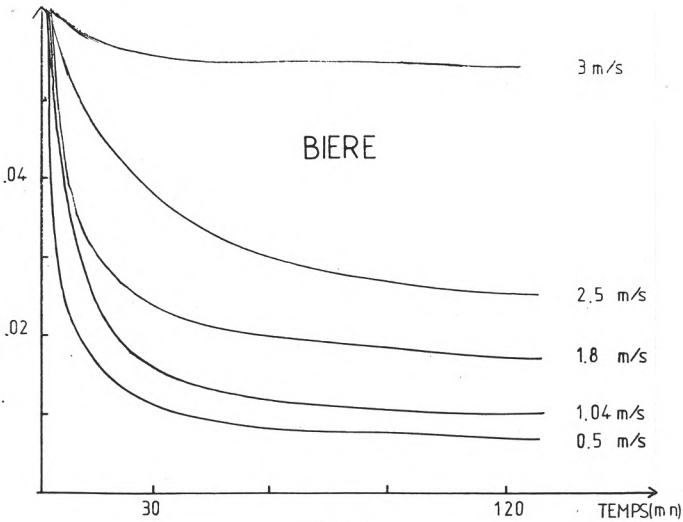


fig. 1

Influence de la vitesse tangentielle sur les flux de filtrat de bière.

Influence of cross velocity on beer filtrate rates.

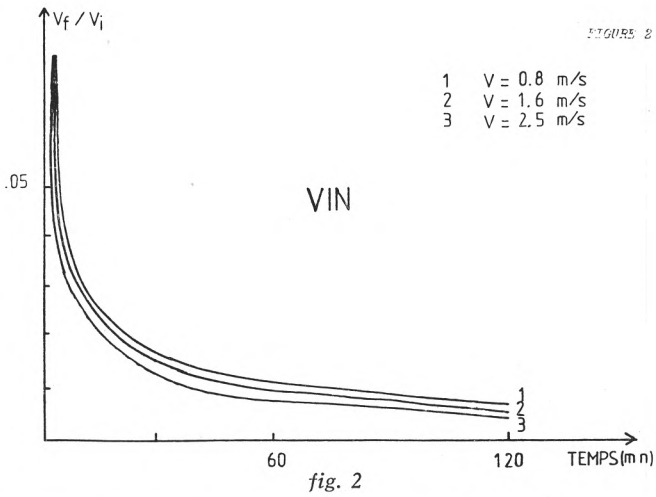


fig. 2

Influence de la vitesse tangentielle sur les flux de filtrat de vin.

Influence of cross velocity on wine filtrate rates.

Dans ces deux cas, sous une différence de pression moyenne de 0.5 bar entre l'écoulement et le filtrat, les débits de filtrat ont été mesurés pour des vitesses tangentielles comprises entre 0.5 et 3 m/s.

D'une manière générale, il apparaît toujours une décroissance très importante de la vitesse de filtration dans les premières 15 min puis une stabilisation du débit pour la bière et une diminution progressive lente pour le vin.

L'influence de la vitesse d'écoulement se traduit de manière différente en fonction du liquide à filtrer :

- pas de modification appréciable des débits de filtrat en fonction de la vitesse tangentielle dans le cas du vin ;
- augmentation appréciable des débits de filtrat à vitesses élevées dans le cas de la bière.

III. MODELES MATHEMATIQUES

Les mécanismes de formation des dépôts et de colmatage peuvent être considérés à partir des lois classiques de la filtration clarifiante à pression constante (tab. 1).

On constate alors une grande influence de la vitesse d'écoulement.

Ainsi, une microfiltration tangentielle à faible vitesse peut être représentée par une loi de filtration sur gâteau ou comme une loi de

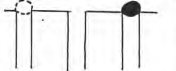

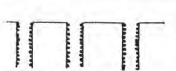
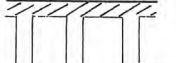
FILTRATION CLARIFIANTE	(1)		COLMATAGE TOTAL DES PORES	$K_1 v = Q_0 - Q$
	(2)		COLMATAGE PARTIEL DES PORES	$\frac{1}{Q} = K_2 t + \frac{1}{Q_0}$
	(3)		COLMATAGE PROGRESSIF DES PORES	$\frac{t}{v} = K_3 t + \frac{1}{Q_0}$
	(4)		FILTRATION SUR GATEAU	$\frac{t}{v} = K_4 v + \frac{1}{Q_0}$

TABLEAU 1 — TABLE 1

Lois de filtration à pression constante
Constant pressure blocking filtration laws

colmatage total (cas de particules de diamètres proches à la taille des pores).

A plus grande vitesse, les équations représentatives sont celles du colmatage partiel ou progressif des pores.

On peut également établir un modèle hydrodynamique où sont pris en compte le bilan de masse (1), le bilan de quantité de mouvement (2) et l'équation de Darcy (3).

$$(1) \frac{dQ_o}{dx} + v_t S_r = 0.$$

$$(2) \frac{1}{S^2_t} \frac{d}{dx} (\rho_1 Q_o^2) + \frac{dP}{dx} + \frac{1}{R_H} C_r \rho_1 \frac{Q_o^2}{2S^2_t} = 0.$$

$$(3) \mu R v_r + \Delta P = 0.$$

Une vitesse d'écoulement donnée détermine un gradient de perte de charge dans l'écoulement principal qui implique un gradient de débit de filtrat.

L'épaisseur de la couche limite définit l'épaisseur de la sous-couche laminaire donc la capture des particules à l'entrée des pores et le dépôt.

La résistance hydraulique (R) du dépôt est fonction des paramètres suivants :

- résistance initiale du milieu filtrant ;
- vitesse tangentielle ;
- concentration initiale en particules ;
- distribution granulométrique des particules ;
- distribution de la taille des pores ;
- temps.

$$(4) R = f (R_o, v_o, C_o, d_g, d_p, t).$$

L'on dispose alors d'une quatrième équation qui permet de fermer le système d'équations (1) à (3).

La modélisation de cette résistance R dépend du mécanisme de colmatage :

— dans le cas de la microfiltration tangentielle de la bière, il existe un débit de filtrat quasi-stabilisé. Ceci correspond au cas de figure théorique d'une loi avec colmatage progressif des pores. Cependant, ce schéma n'explique pas l'influence non négligeable de la vitesse tangentielle. On peut faire l'hypothèse de l'existence à la surface de la membrane filtrante d'un gel colloïdal qui se comporterait comme un fluide visqueux s'écoulant à l'intérieur des pores. Ce

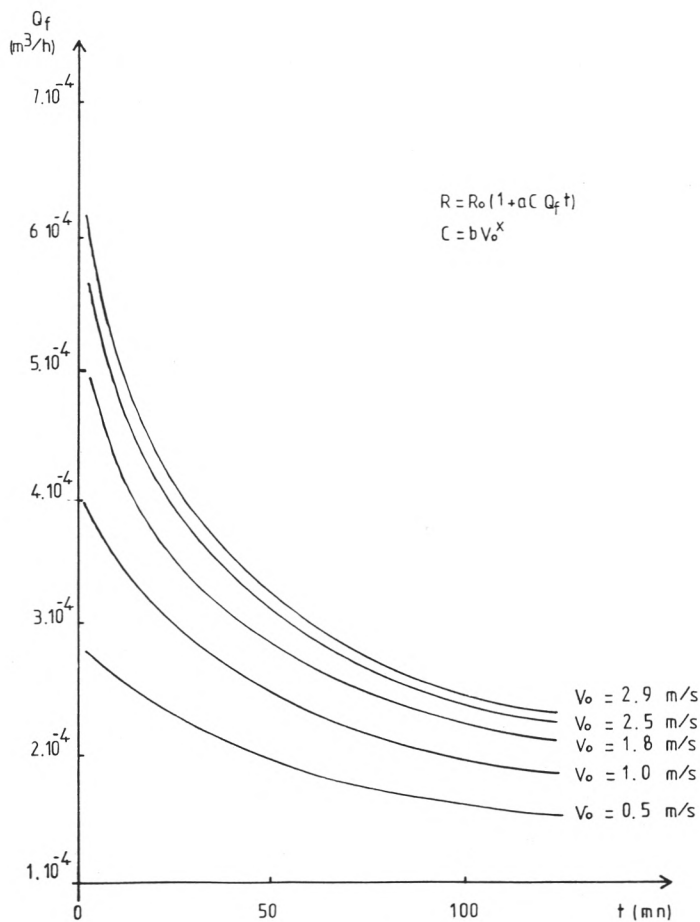


fig. 3

Débit de filtrat calculé.

* Calculated fluxes of filtrate.

mécanisme de colmatage ne peut être envisagé que pour une suspension où les particules microniques ne se déposent pas (cas de la bière, fig. 3) ;

— dans le cas du vin, la distribution granulométrique est plus étalée et la quantité de particules colloïdales est moins importante.

Il y a alors formation d'un dépôt hétérogène de particules à la surface de la membrane (loi de colmatage partiel des pores) certainement associé à un colmatage interne des pores par adsorption (loi de colmatage progressif des pores).

La modélisation de la résistance est faite de manière empirique en tenant compte des paramètres dont elle dépend :

$$(4) \quad R = R_0 (1 + aCQ_r t) \\ \text{ou } C = bV_0^c.$$

Toutefois, dans le cas de la bière, il n'a pas été possible, après ajustement sur une courbe expérimentale correspondant à une vitesse d'écoulement donnée, de retrouver les résultats expérimentaux correspondant à une autre vitesse d'écoulement.

Les travaux en cours devraient permettre de préciser la forme de l'équation (4).

CONCLUSION

Les mesures de débits de filtrat effectuées en microfiltration tangentielle de la bière et du vin, montrent une influence de la vitesse d'écoulement différente suivant le liquide.

Les lois classiques de la filtration clarifiante peuvent représenter l'influence de la vitesse tangentielle de manière indirecte : Ainsi, les mécanismes de colmatage et de formation de dépôt en microfiltration tangentielle de la bière peuvent être associés à une loi de colmatage progressif des pores (adsorption) combinée avec la formation d'un gel s'écoulant à l'intérieur des pores. En microfiltration tangentielle du vin, les résultats expérimentaux correspondent à une loi de colmatage partiel des pores liée à un phénomène d'adsorption. Les conditions d'écoulement jouent un rôle essentiel.

Pour chaque suspension, il existe une vitesse tangentielle limite au-delà de laquelle les particules ne se déposent plus.

Il est possible d'établir un modèle hydrodynamique qui s'appuie sur les bilans de matière et de quantité de mouvement, mais nécessite une relation entre l'évolution de la résistance et les grandeurs opératoires, notamment la vitesse d'écoulement.

L'influence de la vitesse d'écoulement seule ne permet pas de représenter complètement des mécanismes de colmatage et de dépôt en raison d'une concentration en matières colloïdales importante qui impose de tenir compte des forces de nature physico-chimique entre les particules et la membrane filtrante.

Nomenclature

a : constante	(-)	R : résistance hydraulique	m^{-1}
b : constante	(-)	R_H : rayon hydraulique	m
C_o : concentration initiale	Kgm^{-3}	S_f : surface filtrante	m^2
c : constante	(-)	S_t : section transversale	m^2
C_f : coefficient de frottement	(-)	t : temps de filtration	s
d_g : diamètre des particules	m	V_I : flux de filtrat initial	ms^{-1}
d_p : diamètre des pores	m	V_f : flux de filtrat	ms^{-1}
P : pression	Pa	x : abscisse longitudinale	m
Q_o : débit tangentiel	m^3s^{-1}	μ : viscosité dynamique	$Kgm^{-1}s^{-1}$
Q_f : débit de filtrat	m^3s^{-1}	ρ_l : masse volumique du liquide	Kgm^{-3}
