

---

**DECROISSANCE  
OU  
DEGRADATION DU PLATE-OUT**

---

<b>Introduction</b>	<b>p. 151</b>
<b>I. Comment améliorer la physique du modèle hydrodynamique</b>	<b>p. 152</b>
<b>1. Amorce du mécanisme de Wilson</b>	<b>p. 152</b>
<b>2. Intégrité des piliers</b>	<b>p. 152</b>
2.1. Description du phénomène d'érosion latérale	p.152
2.2. Détermination du profil de vitesse	p.153
2.3. Situation des gouttes d'huile	p.155
2.4. Equations et méthode de résolution	p.156
2.5. Résultats	p.157
<b>3. Conclusion</b>	<b>p. 157</b>
<b>II. Le plate-out</b>	<b>p. 159</b>
<b>1. Formation du plate-out</b>	<b>p. 159</b>
1.1. La première goutte d'émulsion	p. 159
1.2. Hypothèses simplificatrices	p. 160
1.3. Mise en équation	p. 161
1.4. Epaisseur d'huile maximale déposée sur la tôle	p. 165
1.5. En application directe : vitesse de première restriction	p. 166
<b>2. Destruction du plate-out</b>	<b>p. 167</b>
2.1. Force centrifuge	p.167
2.2. Entrée dans le mur d'eau	p.167
2.3. Diminution du grammage (en application directe)	p.167
<b>3. Couplage Plate-out – Szeri – Wilson</b>	<b>p. 170</b>
3.1. Couplage Plate-out – Wilson	p.170
3.2. Couplage Plate-out – Szeri – Wilson	p.172
<b>4. Conclusion</b>	<b>p.174</b>
<b>Conclusion</b>	<b>p.175</b>

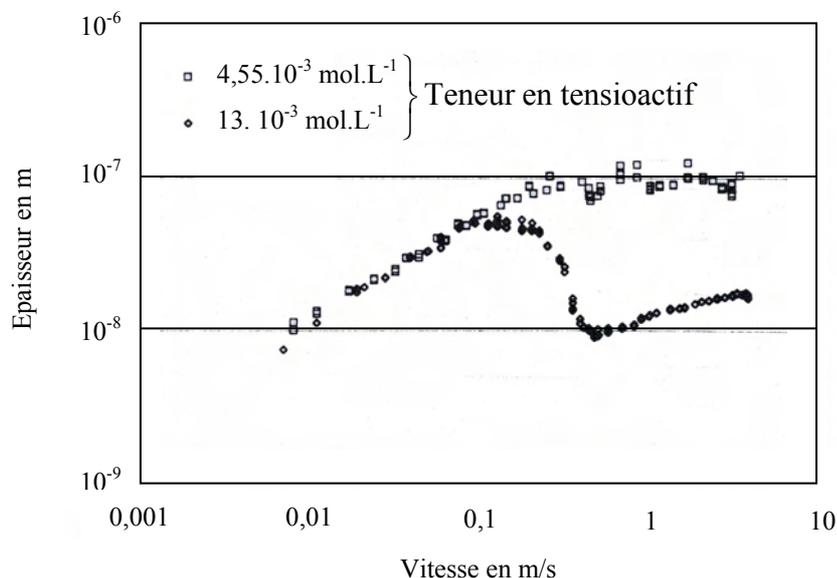


## Introduction

Les modèles hydrodynamiques développés donnent comme seule explication possible à la dégradation du frottement, l'entrée massive de l'eau pour une certaine vitesse critique. Cependant ils ne rendent pas compte d'une tendance révélée par plusieurs expériences qui est la décroissance de l'épaisseur du film, lors de l'utilisation de certaines émulsions. Or une baisse d'épaisseur conduit à une hausse du taux de plateaux donc du frottement. Dès lors se posent les questions suivantes : est-ce que la hausse du frottement est due à l'entrée de l'eau ou à cette baisse d'épaisseur ? Sommes nous en présence de deux causes possibles ? Si tel est le cas laquelle survient en premier ?

Pour certaines huiles, une hausse minime de la vitesse provoque une croissance brutale du frottement, alors que pour d'autres l'augmentation du frottement avec la vitesse se fait de manière progressive [8]. Doit-on voir dans cette différence comportementale le signe de l'existence effective de deux mécanismes différents ?

Pour illustrer ce phénomène de décroissance, seront cités les résultats de l'expérience de Spikes [31]. Spikes a tracé la courbe (fig. n°3.1) donnant l'évolution de l'épaisseur (mesurée par interférométrie) en fonction de la vitesse (en contact ponctuel) pour deux émulsions aux taux d'émulsifiant différents. Aux basses vitesses et comme attendu l'une et l'autre suivent la courbe de l'huile pure. Cependant, avec l'augmentation de la vitesse l'une quitte la courbe de l'huile pour former un palier alors que l'autre accuse une décroissance des plus brutales. Cela montre encore une fois l'importance de la chimie, et souligne la complexité des mécanismes mis en jeu : en effet, ce phénomène de décroissance n'existe que dans certaines circonstances qu'il nous faudra bien déterminer.



**Figure n° 3.1 : la courbe d'épaisseur de l'émulsion (4% d'huile) peut soit former un palier soit accuser une forte décroissance.**  
**Fig. (1.23) [31]**

Comment se fait-il que les modèles présentés ne sont pas en mesure de faire état de cette décroissance ? En effet le modèle de Szeri montre que l'épaisseur croît avec l'augmentation de la vitesse. Idem pour Wilson, à ceci près que Wilson fait état de l'existence d'un palier. Certes un palier n'est pas une décroissance, mais le modèle montre qu'il existe bien une zone où l'épaisseur cesse de croître.

## I. Comment améliorer la physique du modèle hydrodynamique

### 1. Amorce du mécanisme de Wilson :

Le mécanisme de Wilson, s'initie lorsque  $h=2.C.r_g$ . Rien ne dit que les valeurs de C et de  $r_g$  restent constantes lorsque la vitesse augmente.

En effet, les taux de cisaillement augmentent avec la vitesse, ce qui pourrait entraîner un fractionnement des gouttes d'huile et donc une diminution de la valeur de  $r_g$ . A ce sujet, les auteurs de l'étude [45] sont arrivés au résultat suivant : dans le cas d'une goutte peu visqueuse, placée dans un flux visqueux cisailant, si le nombre capillaire ( $Ca$ ) est plus grand qu'une certaine valeur critique ( $Ca_{cr.}$ ) liée au rapport des viscosités, alors l'intégrité de la goutte n'est plus préservée [45].

$$(3.1) \quad \begin{cases} Ca = \mu_c r_g \dot{\gamma} / \zeta_s \\ Ca_{cr.} = 0,05.(\mu_d / \mu_c)^{2/3} \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \zeta_s : \text{tension de surface} \\ \dot{\gamma} : \text{taux de cisaillement} \end{cases}$$

Si ce résultat est valable pour les gouttes visqueuses placées dans un flux cisailant peu visqueux, alors l'hypothèse, du fractionnement des gouttes d'huile, pourrait bien devenir très intéressante. En effet, dans le cas qui nous préoccupe, la valeur du nombre capillaire est proche de 1, donc bien supérieure à la valeur de  $Ca_{cr.}$ . Le taux de cisaillement augmentant lorsqu'on avance dans le contact, le fractionnement pourrait intervenir dans le convergent à partir d'un point tel  $Ca > Ca_{cr.}$ . Ce fractionnement entraînerait par contrecoup une diminution de l'épaisseur d'huile (comme le montre particulièrement le modèle de Wilson).

De même, la valeur du paramètre C détermine l'endroit où la goutte d'huile est capable de s'accrocher aux surfaces antagonistes et de rester accrochée ; faisant ainsi face au retour de l'eau, qui selon toute vraisemblance œuvre au décrochage des gouttes d'huile. Or plus la vitesse augmente, plus le rejet de l'eau est vigoureux, et plus il faudra (a priori) que la goutte d'huile soit écrasée (que les piliers soient larges, et C petit) pour faire face à l'importance du reflux.

Par conséquent, une décroissance de C ou de  $r_g$  pourrait être une explication tout à fait valable de la chute d'épaisseur qui est constatée expérimentalement. Nous allons plus particulièrement détailler une autre cause potentielle.

## 2. Intégrité des piliers

### 2.1. Description du phénomène d'érosion latérale

Les "piliers" d'huile sont écrasés au fur et à mesure qu'ils progressent dans l'emprise, et l'eau de l'écoulement retour circule autour de ces piliers, à grande vitesse comme nous allons le voir. Wilson a considéré que les piliers d'huile constituaient une gêne à l'écoulement retour de l'eau, et a introduit des facteurs d'écoulement pour en tenir compte. Mais cette interaction huile  $\rightarrow$  eau ne s'accompagne pas, chez lui, de l'interaction réciproque eau  $\rightarrow$  huile. Celle-ci pourrait prendre la forme de l'érosion latérale des gouttes d'huile - voire même du décrochement de l'huile des surfaces solides en mouvement, mais nous n'irons pas jusque là.

Toute l'huile ainsi arrachée aux piliers et entraînée vers l'arrière par l'écoulement retour majoritairement composé d'eau diminuerait le débit positif d'huile, ce qui ne manquerait pas d'amincir le film. Avant d'essayer de rendre compte de ce phénomène il est intéressant d'évaluer la vitesse de retrait de l'eau.

## 2.2. Détermination du profil de vitesse

Le modèle de Wilson donne les équations suivantes :

$$(3.2) \quad \begin{cases} Q_d = Uh\phi(1 - VF_2GP) \\ Q_c = Uh(1 - \phi)(1 - F_5GP) \end{cases}$$

Les débits d'huile et d'eau,  $Q_d$  et  $Q_c$  restent naturellement constants tout le long de l'emprise.

Expression du profil de vitesse du lubrifiant, lorsque la tôle et le cylindre ont même vitesse.

$$(3.3) \quad \text{L'équation de Reynolds donne : } \bar{v}(x, z) = \frac{1}{2\eta} \frac{dP}{dx} z[z - h(x)] + U$$

Une fois résolu le système précédent, et les valeurs de  $\frac{dP}{dx}$  relevées, il est possible de tracer les

(3.4) courbes d'iso-vitesse. Il suffit pour cela de résoudre :  $\bar{v}(z)|_x = U_e$  avec  $U_e$  la vitesse du fluide considéré. Les solutions étant :

$$(3.5) \quad z_1 = \frac{1}{2} \left( h - \sqrt{h^2 - 8\mu \frac{U - U_e}{dP/dx}} \right) \quad \text{et} \quad z_2 = \frac{1}{2} \left( h + \sqrt{h^2 - 8\mu \frac{U - U_e}{dP/dx}} \right)$$

### Champ de vitesse de l'huile dans le convergent :

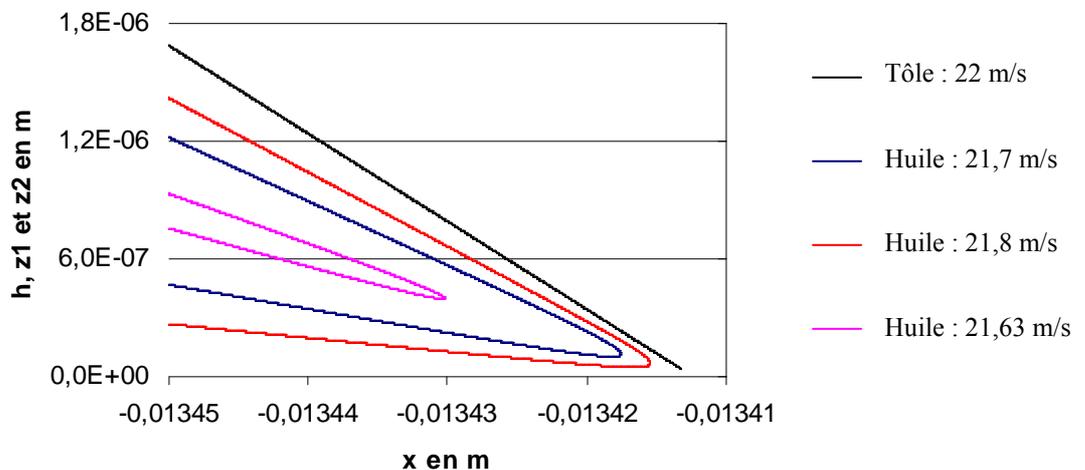


Figure n°3.2 : Courbes d'iso vitesse pour l'huile dans la zone d'entrée en laminage. La vitesse des parois est ici de 22 m/s. N.B. : Le débit d'huile reste bien constant car si  $h$  diminue,  $\Phi$  augmente.

Le profil de vitesse de l'huile (fig. n°3.2) montre sans ambiguïté que les gouttes sont irrémédiablement entraînées vers l'aval et ce dès qu'elles touchent les deux surfaces antagonistes. Par conséquent toute l'huile qui arrive en  $h=2.r_g$  sert à alimenter le contact. Comme cela fait parfois beaucoup d'huile, l'idée a été d'introduire un paramètre  $C$  : le mécanisme de Wilson ne commence alors qu'à partir du moment où la goutte a été écrasée  $k_c$  fois, avec  $k_c=1/C$ . Mais parfois il arrive que la valeur de  $k$  soit supérieure 30. Cette valeur, il est vrai laisse perplexé : une goutte écrasée 30 fois !

### Champ de vitesse de l'eau dans le convergent :

L'espace près des parois où l'eau a encore la possibilité de progresser dans le contact est plus restreint. Majoritairement l'eau est éjectée du contact, avec une vitesse d'autant plus élevée qu'elle se trouve au cœur (donc loin des parois en mouvement) et près du contact (voir figure n°3.3).

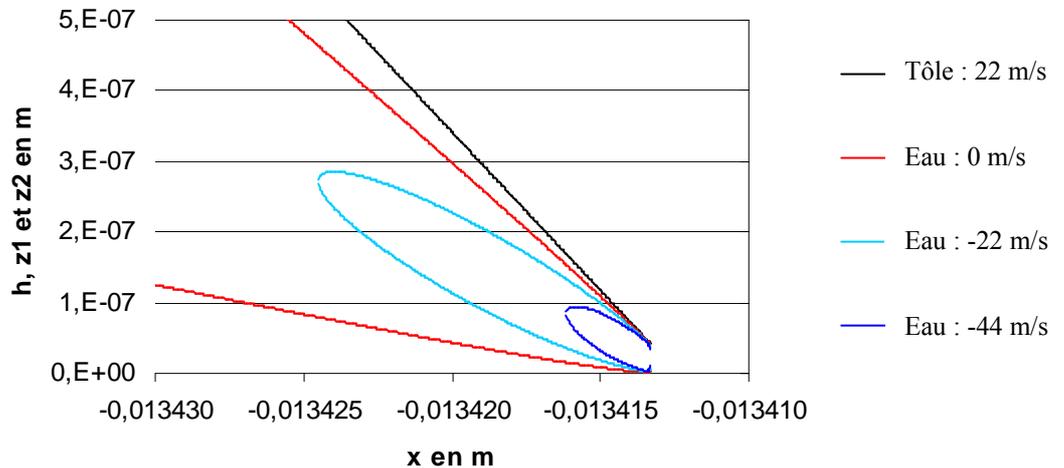


Figure n°3.3 : Courbes d'iso vitesse pour l'eau

Evaluons la vitesse moyenne du retrait de l'eau :

$$(3.6) \quad |V_{\text{retrait de l'eau}}^{\text{moyenne}}| = \left| \frac{1}{z_2 - z_1} \int_{z_1}^{z_2} v(z) \Big|_x dz \right| \quad d'où : |V_{\text{retrait de l'eau}}^{\text{moyenne}}| = \left| \left[ \frac{1}{2\mu_c} \frac{dP}{dx} \left( \frac{z^3}{3} - \frac{hz^2}{2} \right) + Uz \right]_{z_1}^{z_2} \right|$$

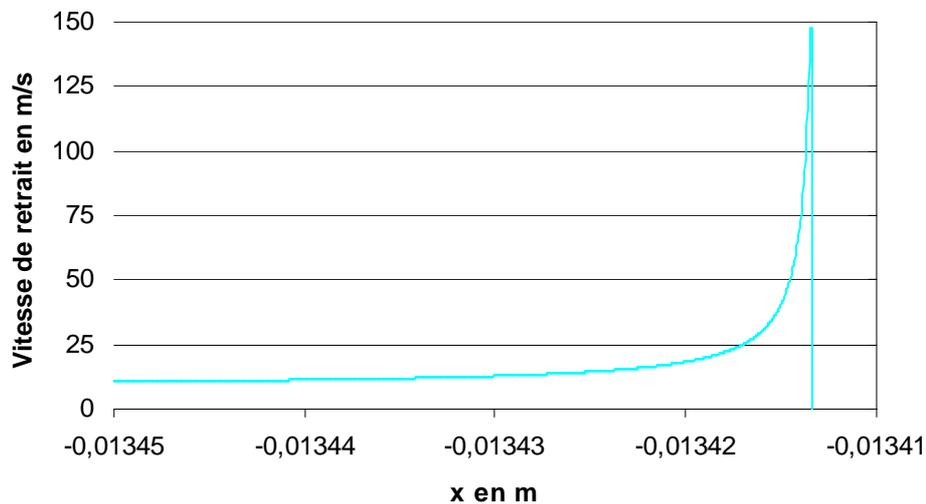


Figure n°3.4 : Vitesse moyenne du retrait de l'eau le long de l'emprise

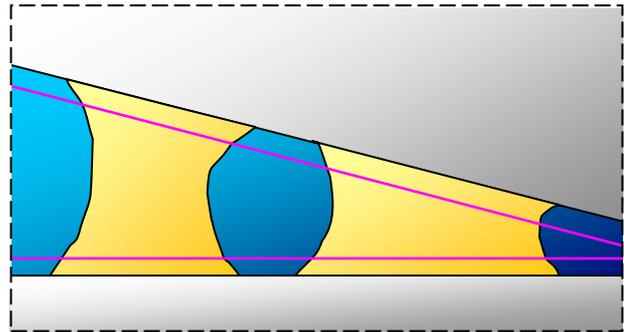
Lorsque la vitesse d'entraînement  $U = 20\text{m/s}$ , l'écoulement retour de l'eau peut atteindre localement  $150\text{ m/s}$  ! A cette vitesse, des interactions avec les piliers d'huile ne sont pas improbables.

### 2.3. Situation des gouttes d'huile

L'hypothèse selon laquelle l'eau circulant autour des gouttes d'huile écrasées n'altérerait pas les piliers d'huile est donc plutôt forte.

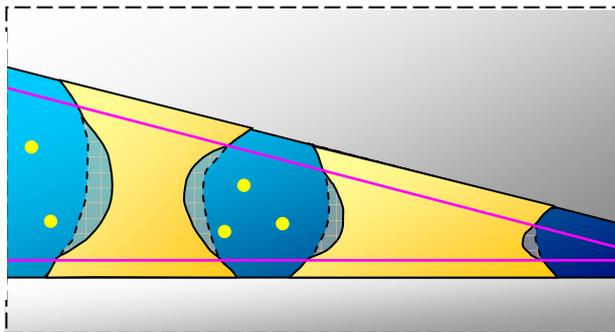
Deux configurations extrêmes se présentent d'abord à nous :

- l'adhérence de la goutte aux parois est suffisamment grande pour faire face au reflux. C'est le cas si la chimie de l'émulsion est telle que l'huile mouille fortement les parois (et on peut penser qu'on est alors proche de  $C=1$ ).
- Au contraire, dès que le courant d'eau devient trop fort, les gouttes d'huile se décrochent des deux surfaces antagonistes. Cela revient à dire que l'huile a peu de chances d'entrer dans l'emprise. Ce sera le cas des émulsions à faible pouvoir de déplacement (et  $C$  sera "petit" - il est difficile de préciser davantage, tant ce paramètre est difficile à cerner).



*Figure n° 3.5 : les gouttes d'huiles sont écrasées entre la tôle et le cylindre et progressent vers la zone de contact. Cependant l'eau évolue en sens inverse dans l'espace délimité par les deux courbes roses.*

Pour une émulsion efficace, la première hypothèse nous semble plus proche de la réalité. Mais nous allons en fait en examiner une variante, dans laquelle la goutte présente une forte adhésion aux deux parois (comme "pilier"), ce qui fait que le maillon faible est la cohésion de la goutte d'huile : sous l'effet des forces hydrodynamiques d'interaction avec l'eau, ce n'est pas l'interface huile - paroi qui cède, mais la goutte elle-même qui s'érode (fig. n°3.6).



*Figure n° 3.6 : l'eau circulant autour des piliers d'huile érode ces piliers et en diminue la portance.*

L'eau, chargée en tensio-actifs, passe à grande vitesse autour de ces piliers. La quantité d'huile  $\xi$  qui est arrachée aux piliers se retrouve dispersée dans le volume de l'eau située alentour. Nous nous retrouvons donc avec un système complexe : grosses gouttes d'huile qui vont conduire à la mise en pression et gouttelettes d'huile dispersées dans la phase aqueuse.

Afin de simplifier le problème, nous avons considéré que cette phase

aqueuse, dans laquelle sont dispersées les gouttelettes d'huile, a la viscosité de l'eau. Cette approximation n'a rien d'exceptionnel. En effet, lorsqu'une émulsion adopte la configuration présentée dans le [chapitre 1 paragraphe III.1.1](#), alors la présence des gouttelettes d'huile a peu d'influence sur la viscosité du mélange. Voir par ailleurs les résultats de la figure [n°0.6](#).

## 2.4. Equations et méthode de résolution

L'intégration est ici rétrograde.

Conditions aux limites : en  $h_n$ , est fixée la valeur de la pression et du gradient de pression

$$(3.7) \quad \text{adimensionnalisé : } \begin{cases} P = \sigma \\ GP = 0 \end{cases}$$

Une double recherche est ensuite effectuée sur les valeurs de  $\phi_n$  et  $h_n$ .

Connaissant  $\phi_n$ ,  $P_n$  et  $GP_n$ , il est alors possible de calculer les valeurs de  $Q_{d,n}$  et de  $Q_{c,n}$ , car :

$$(3.8) \quad \begin{cases} Q_{d,n} = Uh_n\phi_n \\ Q_{c,n} = Uh_n(1-\phi_n) \end{cases}$$

Tout ceci permet de calculer la valeur de la vitesse moyenne d'éjection de la phase aqueuse (avec gouttelettes) en  $x_n$  :

$$(3.9) \quad z_{1,n} = \frac{1}{2} \left( h_n - \sqrt{h_n^2 - 8\mu_c \frac{U}{\frac{dP}{dx}\bigg|_n}} \right) \quad \text{et} \quad z_{2,n} = \frac{1}{2} \left( h_n + \sqrt{h_n^2 - 8\mu_c \frac{U}{\frac{dP}{dx}\bigg|_n}} \right)$$

$$(3.10) \quad \left| V_{\text{retrait de l'eau}}^{\text{moyenne}} \right|_n = \left[ \frac{1}{2\mu_c} \frac{dP}{dx}\bigg|_{x_n} \left( \frac{z^3}{3} - \frac{hz^2}{2} \right) + Uz \right]_{z_{1,n}}^{z_{2,n}}$$

(3.11) Nous proposons que l'érosion soit proportionnelle à la valeur absolue de la vitesse moyenne de retrait de la phase aqueuse :  $\xi_n = \bar{k}_c \left| V_{\text{retrait de l'eau}}^{\text{moyenne}} \right|_n$ . Cela revient d'une certaine manière à réintroduire un terme d'interaction huile - eau (entraînement de la phase huile par la phase eau), sous une forme simple facile à intégrer au modèle de Wilson, la quantité d'huile arrachée aux piliers étant proportionnelle à la vitesse de l'eau. Afin de poursuivre le calcul à l'incrément précédent, il suffit d'ajouter (l'intégration étant rétrograde)  $\xi_n$  au débit de la phase huile et de soustraire ce même  $\xi_n$  au débit de la phase aqueuse.

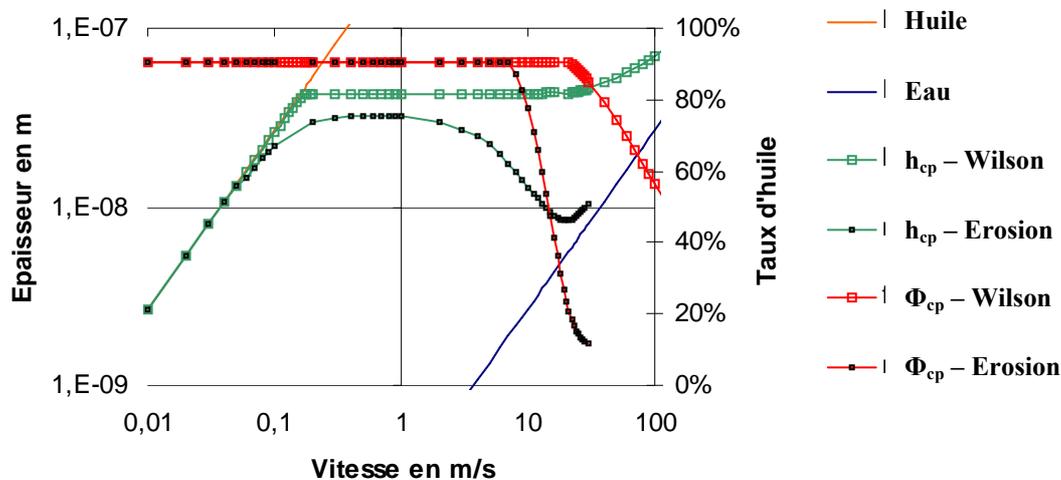
$$(3.12) \quad \begin{cases} Q_{d,n-1} = Q_{d,n} + \xi_n = Uh_{n-1}\phi_{n-1}(1 - V_{n-1}F_{2,n-1}GP_{n-1}) \\ Q_{c,n-1} = Q_{c,n} - \xi_n = Uh_{n-1}(1-\phi_{n-1})(1 - F_{5,n-1}GP_{n-1}) \end{cases}$$

Au final, en  $h=2.r_g$ , la pression doit être nulle et le taux d'huile doit valoir  $\phi_0$ . Cela s'obtient par un bon ajustement des valeurs de  $\phi_{cp}$  et de  $h_{cp}$ .

Certes, a été substituée une inconnue par une autre : C par  $\bar{k}_c$ , tout aussi indéterminable. Cependant, la physique paraît ici plus complète. Cette approche heuristique ne se justifiera que si les résultats obtenus présentent en meilleur accord avec les résultats expérimentaux.

## 2.5. Résultats :

Voir annexe, pour les paramètres dont la valeur n'est pas notée.



*Figure n°3.7 : Intégrant le phénomène d'érosion latérale le modèle rend compte de la décroissance de l'épaisseur.*

La **figure 3.7** montre, pour les conditions - standards utilisées tout au long de ce mémoire, l'effet d'une érosion des piliers d'huile par l'écoulement retour de l'eau, avec un coefficient  $\bar{k}_c$  dont la valeur a été choisie pour montrer qu'une décroissance peut effectivement apparaître dans la zone droite du plateau d'épaisseur. C'est donc un mécanisme possible d'explication du phénomène dans le cadre du modèle de Wilson (ou du modèle couplé Szeri-Wilson), mais l'incertitude sur le coefficient de proportionnalité ne permet pas d'affirmer que c'est bien là le seul mécanisme, ou même le mécanisme principal.

## 3. Conclusion

Bien que le modèle couplé Szeri-Wilson puisse retrouver un grand nombre de résultats il n'est pas en mesure de prévoir la baisse d'épaisseur du film qui peut survenir pour certaines émulsions dans le domaine des vitesses intermédiaires, car la description qu'il fait de la physique des interactions est manifestement trop simple.

Afin de l'enrichir, des raisons pouvant induire cette décroissance ont été décrites. Il a ainsi, entre autre, été fait mention de l'amorçage tardif du mécanisme de Wilson dû au retrait de l'eau, du fractionnement des gouttes consécutif au cisaillement élevé, ou encore de l'érosion des piliers d'huile. C'est ce dernier mécanisme que nous avons détaillé, montrant qu'il *pourrait* être à l'origine de tout ou partie du phénomène.

Tout ceci reste cependant fortement spéculatif et nous ne sommes pas en mesure de dire exactement laquelle de ces raisons est la cause réelle de cette chute d'épaisseur.



## II. Le plate-out

Une autre cause potentielle de baisse d'épaisseur à vitesse moyenne - forte est le plate-out, c'est-à-dire la quantité d'huile déposée sur la tôle, film formé avant même l'entrée de la zone de mise en pression et participant donc au premier chef à l'alimentation du contact. Il est logique de penser que la quantité d'huile déposée est sensible à deux phénomènes dépendant de la vitesse :

- Une plus grande vitesse, c'est pour chaque surface élémentaire de tôle moins de temps passé sous les buses. Le débit de celles-ci étant rarement assujetties à la vitesse, la quantité d'huile fournie baisse.
- Une plus grande vitesse, c'est aussi un temps plus court entre l'arrosage et l'entrée d'emprise, et donc probablement un phénomène de déposition moins achevé.

Avant de nous lancer dans une description de tous les phénomènes qui de près ou de loin pourraient être à l'origine d'une altération du film plate-out, il est intéressant de se demander quelle est l'épaisseur de ce film.

Il convient également de présenter au préalable les deux grandes méthodes d'aspersion.

- **L'application directe** : le débit d'émulsion est faible, donc le débit d'huile très petit. Si la vitesse augmente on peut penser que le système sera facilement sous-alimenté par manque d'huile. Par contre, l'émulsion est très instable, l'huile se dépose très bien (ou très vite) et s'accroche à la surface ("l'émulsion a un bon plate out").
- **La recirculation** : il y a un très fort débit d'émulsion, donc beaucoup d'huile est envoyée sur la tôle. Mais seule une petite partie de cette huile s'y accroche, parce que l'émulsion est plus stable par construction (tensio-actifs). Dans ce cas les mécanismes hydrodynamiques Szeri-Wilson semblent avoir un rôle important à jouer dans la formation du film lubrifiant.

### 1. Formation du plate-out

#### 1.1. La première goutte d'émulsion

Lorsqu'une goutte, d'huile pure ou d'émulsion, est projetée sur une tôle, elle commence par s'aplatir, et la surface de contact croît sous l'effet de la collision : on parle alors de mouillage forcé. A cette phase d'étalement peut succéder une deuxième phase de rétraction [46].

Si cette deuxième phase est dominée par des effets capillaires et dépend de la nature de l'émulsion ou de l'état de surface de la plaque, il n'en va pas de même pour la phase d'étalement. En effet, cette phase est essentiellement fonction du nombre de Reynolds, défini par les conditions de l'impact. En conséquence l'étalement est quasi-identique pour toutes les émulsions, du moins aux concentrations modérées ( $\mu \sim \mu_{\text{eau}}$ ).

Les forces visqueuses ont tendance à s'opposer à l'étalement. Le caractère peu visqueux de l'eau fait que la goutte d'émulsion (faiblement chargée en huile) va s'étaler assez facilement et rapidement sur la tôle. En conséquence, les petites gouttes d'huile ( $\mu\text{m}$ ) – contenues dans la grande goutte d'eau (mm) – seront aisément étalées sur la tôle, sous l'effet plaquant de l'eau.

Seulement 5 ms après l'impact, l'eau commencera sa phase de rétraction [46]. 20 à 30 ms plus tard, sur une surface hydrophobe, la goutte d'eau a retrouvé la forme de calotte sphérique de l'équilibre thermodynamique, alors que les gouttes d'huile sont restées étalées sur la tôle.

Pour l'application directe, la durée entre l'aspersion de la tôle et le passage de celle-ci dans l'emprise peut atteindre quelques dizaines de millisecondes. Autrement dit, il est possible que la tôle soit laminée, une fois terminée la phase de rétractation de l'eau : au moment où les gouttes d'huile mouillent parfaitement la tôle, alors que l'eau est à l'équilibre sur cette surface hydrophobe, prête à en être chassée.

Le comportement de cette première goutte d'émulsion est donc bien connu grâce aux travaux de Mme Vigne-Adler. Cependant, le problème ne se résume hélas pas à une seule goutte. En effet lorsque la tôle progresse en direction du contact, elle traverse le jet d'émulsion. Ainsi, en chaque point tombent successivement plusieurs gouttes d'émulsion.

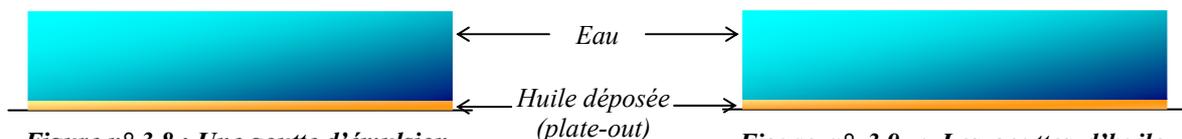
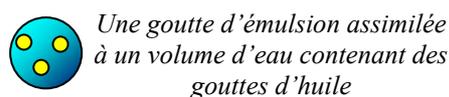
Que se passe-t-il alors ? C'est à cette question précisément qu'il nous faut répondre pour pouvoir donner un ordre de grandeur du film d'huile déposé sur la tôle.

Goutte après goutte, la tôle est recouverte (ou se recouvre) d'un film d'émulsion. Une nouvelle goutte d'huile ne pourra venir s'ajouter au film d'huile déjà présent (ou en formation) qu'à condition de pouvoir traverser le film d'émulsion. Afin de modéliser cette contrainte, quelques hypothèses simplificatrices ont été réalisées.

## 1.2. Hypothèses simplificatrices

**H<sub>1</sub>** : L'eau n'a aucune influence sur le devenir des gouttes d'huile lorsque celles-ci entrent en collision avec le film d'émulsion.

Si tel est le cas, la situation représentée par la **figure 3.8** est équivalente à celle représentée en **figure 3.9** :



**Figure n° 3.8** : Une goutte d'émulsion juste avant qu'elle n'entre en collision avec le film d'eau qui recouvre la tôle.

**Figure n° 3.9** : Les gouttes d'huile contenues dans la goutte d'émulsion ne peuvent compter que sur elles même pour traverser le film d'eau.



**Figure n° 3.10** : La goutte d'émulsion traverse sans problème le film d'eau présent, au risque d'altérer le film d'huile déjà adsorbé sur la tôle.

Pour traverser le film d'émulsion et atteindre la tôle, les gouttes d'huile ne peuvent compter que sur leur énergie propre. En fonction de leur taille, de leur vitesse, de l'épaisseur du film à traverser, il est possible que celles-ci n'atteignent jamais la tôle.

Voyons ce qu'implique l'hypothèse n°1 en nous plaçant dans la situation où cette hypothèse n'est pas faite.

La goutte d'eau qui contient les gouttes d'huile peut aider à traverser le film d'émulsion. A ce moment là les gouttes d'huile ont de fait, toutes les chances d'atteindre la tôle (fig. 3.10). Mais si tel est le cas, l'eau qui contient ces gouttes d'huile va aussi entrer en collision avec le film d'huile déposé sur la tôle, et risque fort de le ré-émulsifier. Le film d'huile déjà présent peut être un reliquat du film déposé sur la tôle lors du passage de celle-ci dans la cage précédente. Il est ainsi difficile de dire si ce phénomène tend à diminuer ou à augmenter l'influence du plate-out. Nous nous placerons cependant dans le cadre défini par l'hypothèse n°1, tout en retenant qu'ainsi les analyses qui suivent ne peuvent donner que des estimations qualitatives.

**H<sub>2</sub>** : Les gouttes d'huile sont assimilées à des solides indéformables.

Il est difficile de dire si une telle hypothèse conduit à sous-estimer ou à surestimer la valeur du plate-out. Si les gouttes d'huile sont déformables, à la traversée du film d'eau, sous l'effet de la **décélération**, elles vont s'aplatir, offrant ainsi une surface de contact de plus en plus grande et diminuant d'autant ses capacités de pénétration. Inversement **l'interaction avec l'eau** donne la tendance inverse : la goutte d'huile a tendance à s'allonger, ce qui augmente ses capacités de pénétration.

**H<sub>3</sub>** : toutes les gouttes d'huile qui atteignent la tôle s'y fixent automatiquement.

On néglige ainsi notamment le fait que les gouttes d'huile pourraient lors de la collision dégrader le film d'huile présent, qu'elles pourraient aussi rebondir et se perdre dans le volume de l'émulsion. On néglige également le fait que la tôle ne peut pas emmagasiner une quantité infinie d'huile. Cette hypothèse contribue ainsi à maximiser la quantité d'huile déposée.

### 1.3. Mise en équation

L'épaisseur limite est l'épaisseur maximale du film d'eau déposé que les gouttes d'huile peuvent traverser avant que ne s'annule leur vitesse.

$$(3.13) \quad \text{On a : } \rho_h V_g \vec{a} = \vec{f}_l - (\rho_e - \rho_h) V_g \vec{g} \quad \text{avec } \vec{a} \text{ le vecteur accélération, } \vec{f}_l \text{ la force de frottement et } V_g \text{ le volume de la goutte d'huile.}$$

Détermination du type d'écoulement afin d'établir le profil de la force de frottement :

$$(3.14) \quad \text{Re} = \frac{2r_g \rho_e V_i}{\mu_c} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} r_g = 10^{-6} \text{ m} \\ \rho_e = 10^3 \text{ kg.m}^{-3} \\ \mu_c = 10^{-3} \text{ Pa.s} \\ V_i = 30 \text{ m.s}^{-1} \end{cases} \quad \text{on a : Re} = 60$$

Les valeurs prises ici pour le rayon des gouttes d'huile et pour leur vitesse d'impact sont typiques des valeurs rencontrées en laminage à froid d'acier (voir § 1.4.)

Puisque le nombre de Reynolds est inférieur à 100, alors l'écoulement est laminaire. Dans ces conditions, selon Stokes [47], la force de frottement s'exerçant sur une sphère de rayon  $r_g$  est proportionnelle à la vitesse et prend la forme suivante :

$$(3.15) \quad \vec{f}_l = -6\pi\mu_c r_g \vec{v}$$

$$(3.16) \quad \text{Avec: } \tau = \frac{\rho_h V_g}{6\pi\mu_c r_g} \Rightarrow \tau = \frac{2}{9} \frac{\rho_h r_g^2}{\mu_c} : \text{ L'équation (3.13) devient: } \frac{dv}{dt} + \frac{v}{\tau} = -\frac{\rho_e - \rho_h}{\rho_h} g$$

$$(3.17) \quad \text{D'où: } \rho_h V_g \vec{a} = -6\pi\mu_c r_g \vec{v} - (\rho_e - \rho_h) V_g \vec{g} \Rightarrow \frac{dv}{dt} + \frac{v}{\tau} = -\frac{\rho_e - \rho_h}{\rho_h} g$$

$$(3.18) \quad v = K_{15} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - \frac{\rho_e - \rho_h}{\rho_h} \tau g$$

Détermination de  $K_{15}$ , la constante d'intégration :

à  $t=0$ ,  $v=V_i$  avec  $V_i$  la vitesse d'impact

$$(3.19) \quad \Rightarrow v = \left( V_i + \frac{\rho_e - \rho_h}{\rho_h} \tau g \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - \frac{\rho_e - \rho_h}{\rho_h} \tau g$$

Temps nécessaire pour que la vitesse des gouttes d'huile s'annule

$$(3.20) \quad \text{Si } v=0, t = \tau \ln\left(1 + \frac{\rho_h}{\rho_e - \rho_h} \frac{V_i}{\tau g}\right)$$

Evaluation du temps nécessaire pour que les gouttes d'huile impactent la tôle :

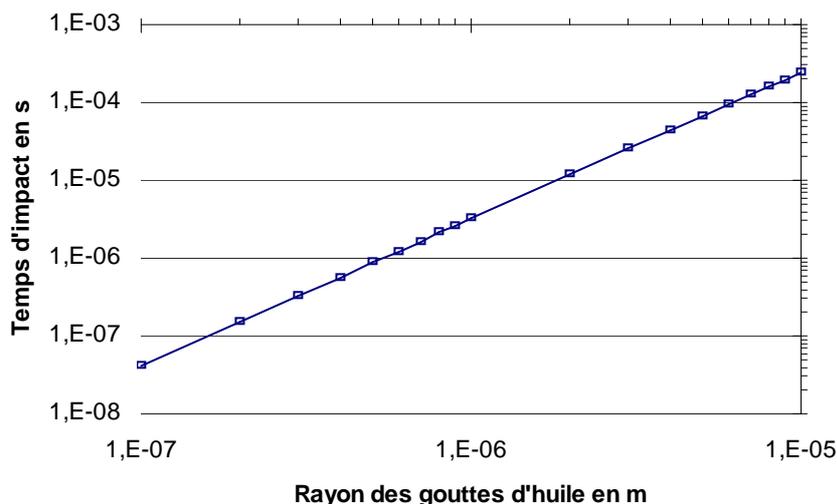


Figure n°3.11 : Quelle que soit la taille des gouttes d'huile, la durée d'impact, donc l'instauration du plate-out se fait pour des temps inférieurs à la milliseconde.

Dans le sens où les gouttes d'huile entrent en contact avec la tôle en moins d'une milliseconde, alors la distance d'aspersion ne devrait pas (du moins selon ce critère) avoir d'importance.

On a :

$$(3.21) \quad \frac{dz}{dt} = - \left( V_i + \frac{\rho_e - \rho_h}{\rho_h} \tau g \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \frac{\rho_e - \rho_h}{\rho_h} \tau g$$

$$(3.22) \quad \Rightarrow z = K_{16} + \tau \left( V_i + \frac{\rho_e - \rho_h}{\rho_h} \tau g \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \frac{\rho_e - \rho_h}{\rho_h} \tau g t$$

Détermination de  $K_{16}$ , la constante d'intégration :

$$(3.23) \quad \text{à } t=0, z=h \Rightarrow z = h - \tau \left( V_i + \frac{\rho_e - \rho_h}{\rho_h} \tau g \right) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] + \frac{\rho_e - \rho_h}{\rho_h} \tau g t$$

Détermination de l'épaisseur maximale d'émulsion pouvant être traversée par ces gouttes d'huile :

Lorsque la vitesse est nulle pour  $z=0$  alors  $h = E_{\text{lim}}$

$$(3.24) \quad \text{D'où : } E_{\text{lim}} = \tau V_i \left[ 1 - \frac{\rho_e - \rho_h}{\rho_h} \frac{\tau g}{V_i} \ln \left( 1 + \frac{\rho_h}{\rho_e - \rho_h} \frac{V_i}{\tau g} \right) \right]$$

$$(3.25) \quad \text{Lorsque } r_g^2 \ll \frac{9\mu_c}{\rho_e - \rho_h} \frac{V_i}{2g}, \text{ ce qui est toujours vrai en pratique}$$

$$(3.26) \quad \text{Alors : } \tau \ll \frac{\rho_h}{\rho_e - \rho_h} \frac{V_i}{g} \Rightarrow E_{\text{lim}} = \tau V_i$$

$$(3.27) \quad \text{D'où : } E_{\text{lim}} = \frac{2\rho_h}{9\mu_c} r_g^2 V_i$$

Manifestement, le  $E_{\text{lim}}$  est proportionnel à la vitesse d'impact et au carré du rayon des gouttes d'huile.

Ce résultat peut être obtenu de manière plus aisée en considérant d'entrée que l'influence des forces de gravité est quantité négligeable, compte tenu du fait que la vitesse d'impact est importante :

$$(3.28) \quad \text{On a : } \frac{dv}{dt} + \frac{v}{\tau} = -\frac{\rho_e - \rho_h}{\rho_h} g \quad \text{avec : } \tau = \frac{2}{9} \frac{\rho_h r_g^2}{\mu_c}$$

Lorsque les forces de pesanteur sont négligées devant les forces de frottement visqueux, alors

$$(3.29) \quad (3.28) \text{ devient : } \frac{dv}{dt} + \frac{v}{\tau} = 0$$

$$(3.30) \quad \text{d'où : } v = K_{15} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

Détermination de  $K_{15}$ , la constante d'intégration :

$$(3.31) \quad \text{à } t=0, v=V_i \text{ avec } V_i \text{ la vitesse d'impact}$$

$$(3.32) \quad \Rightarrow v = V_i \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

On a :

$$(3.33) \quad \frac{dz}{dt} = -V_i \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

$$(3.34) \quad \Rightarrow z = K_{16} + \tau V_i \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

Détermination de  $K_{16}$ , la constante d'intégration :

$$(3.35) \quad \text{à } t=0, z=h \Rightarrow K_{16} = h - \tau V_i$$

$$(3.36) \quad \text{D'où : } z = h - \tau(V_i - v)$$

Détermination de l'épaisseur maximale d'émulsion pouvant être traversée par ces gouttes d'huile :

$$(3.37) \quad \text{Lorsque la vitesse est nulle pour } z=0 \text{ alors } h = E_{\text{lim}}$$

$$(3.38) \quad \text{D'où : } E_{\text{lim}} = \frac{2\rho_h}{9\mu_c} r_g^2 V_i$$

Si la valeur du rayon venait à être plus grande, la valeur du nombre de Reynolds serait supérieure à 100 sans pour autant être supérieure à 1000.

Dans la situation intermédiaire où le nombre de Reynolds est compris entre 100 et 1000, seul un encadrement du  $E_{\text{lim}}$  est possible. En effet lorsque  $100 < \text{Re} < 1000$ , l'écoulement n'est plus tout à fait laminaire et n'est pas encore vraiment turbulent.

Lors de la pénétration, la vitesse des gouttes d'huile diminue jusqu'à ce que l'écoulement devienne réellement laminaire. Considérer que l'écoulement est quoi qu'il arrive (du début à la fin de la pénétration) laminaire revient à faire de  $E_{\text{lim}}^{\text{laminaire}}$  un maximum. Considérer à l'inverse que l'écoulement est turbulent (alors qu'il ne l'est pas réellement puisque  $100 < \text{Re} < 1000$ ) du début de la pénétration jusqu'au moment où  $\text{Re}$  finit par devenir inférieur à 100, revient à faire de  $E_{\text{lim}}^{\text{turbulent}}$  un minimum.

Pour une sphère, lorsque l'écoulement est turbulent, l'expression de la force de frottement [47] est :

$$(3.39) \quad \vec{f}_t = -\frac{1}{4} \rho_e \pi r_g^2 v \vec{v} \quad \text{Soit : } \tilde{\tau} = \frac{4\rho_h V_g}{\rho_e \pi r_g^2} \Rightarrow \tilde{\tau} = \frac{16}{3} \frac{\rho_h}{\rho_e} r_g \quad \text{On a : } \rho_h V_g \vec{a} = \vec{f}_t - (\rho_e - \rho_h) V_g \vec{g}$$

$$(3.40) \quad \text{De même, en négligeant le poids : } \frac{dv}{dt} + \frac{v^2}{\tilde{\tau}} = 0 \Rightarrow \frac{dz}{dt} = \frac{1}{\frac{t}{\tilde{\tau}} + \frac{1}{V_i}} \Rightarrow E_1 = \tilde{\tau} \ln\left(\frac{V_i}{V_{\text{transition}}}\right)$$

$$(3.41) \quad \text{où } E_1 \text{ est l'épaisseur traversée par la goutte d'huile alors que l'écoulement est considéré comme turbulent.}$$

$$(3.42) \quad \text{Lorsque la vitesse égale } V_{\text{transition}}, \text{ l'écoulement redevient laminaire : } V_{\text{transition}} = \frac{\text{Re} \mu_c}{2r_g \rho_e} \text{ avec } \text{Re} = 100$$

D'après (3.27) l'épaisseur pouvant encore être traversée est donc :  $E_1 = \tau V_{\text{transition}}$

$$(3.43) \quad \text{Par conséquent : } E_{\text{lim}} = \frac{\rho_h}{\rho_e} r_g \left[ \frac{100}{9} + \frac{16}{3} \ln\left(\frac{V_i}{V_{\text{transition}}}\right) \right]$$

### 1.4. Epaisseur d'huile maximale déposée sur la tôle

D'après l'hypothèse n° 3, tant que l'épaisseur du film d'émulsion n'est pas supérieure à  $E_{lim}$ , alors toutes les gouttes d'huile arrivant participent à la formation du film d'huile. Par conséquent  $H_{lim}$ , l'épaisseur d'huile maximale déposée sur la tôle peut s'écrire de la manière suivante :  $H_{lim} = \phi_0 E_{lim}$  où  $\phi_0$  est la concentration de l'émulsion avant impact.

(3.44)

*Evolution de  $H_{lim}$  en fonction de la vitesse d'impact, avec  $r_g=2.10^{-6} m$  :*

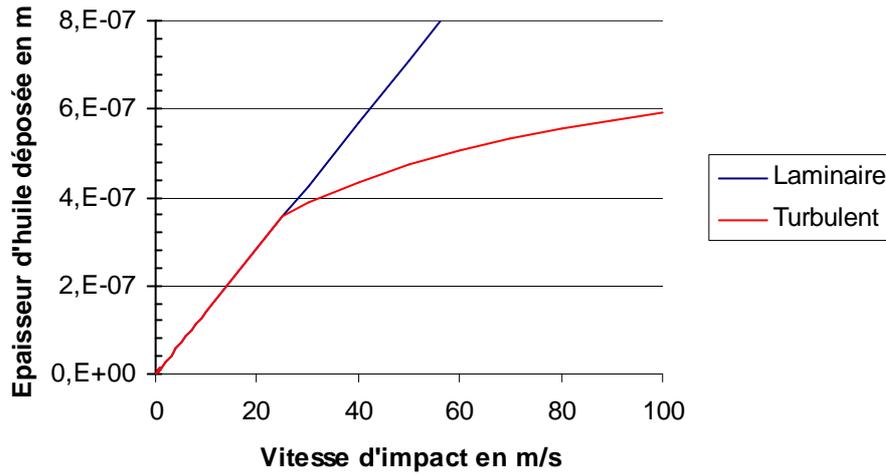


Figure n° 3.12 : l'épaisseur du film plate-out est très faible puisque inférieure au rayon des gouttes d'huile : il n'en est pas moins tribologiquement significatif.

*Evolution de  $H_{lim}$  en fonction de la taille des gouttes d'huile avec  $V_i=30 m.s^{-1}$  :*

(3.45)

$$\left\{ \begin{array}{l} r_g = 10^{-6} m \\ \mu_c = 0,001 Pa.s \\ \rho_e = 10^3 kg.m^{-3} \\ \rho_h = 800 kg.m^{-3} \\ g = 10 m.s^{-2} \\ V_i = 30 m.s^{-1} \\ \phi_0 = 0,02 \end{array} \right.$$

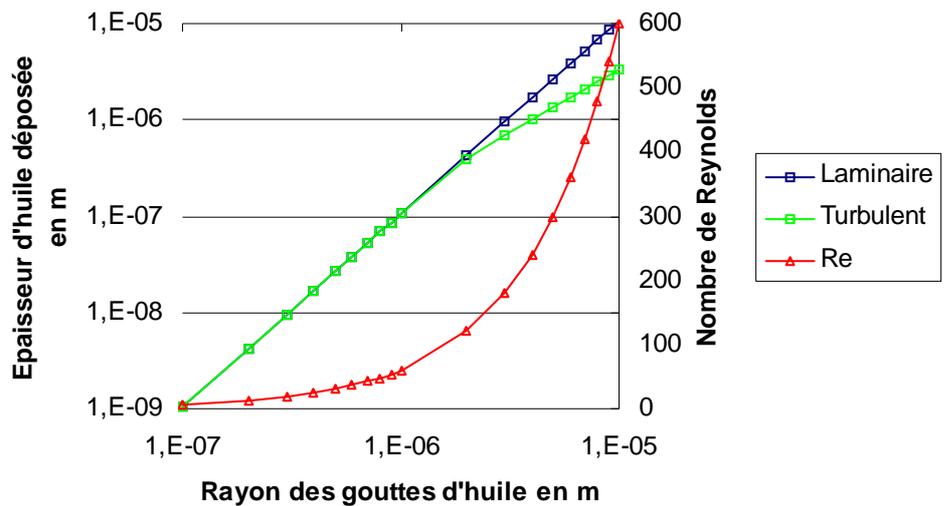


Figure n°3.13 : Evolution du nombre de Reynolds ( $Re$ ) et de l'épaisseur maximale du film d'huile pouvant se déposer sur la tôle, en fonction du rayon des gouttes d'huile.

### ***Justification des valeurs prises pour le rayon des gouttes d'huile...***

A ARCELOR, une étude du système de lubrification a permis d'avoir de précieux renseignements sur la taille des gouttes d'huile. Lorsque l'émulsion (identique à celle utilisée sur site industriel) est préparée et simplement agitée par des pales, le rayon des gouttes est de l'ordre de 10  $\mu\text{m}$ . Après passage dans les pompes qui sont très fortement cisailantes, le rayon est divisé par dix et devient donc égal à 1  $\mu\text{m}$ . Par la suite, ces gouttes seront de nouveau très fortement cisailées, lorsqu'elles passeront dans les buses d'aspersion. Tout ceci nous incite à penser que dans l'industrie, le rayon des gouttes d'huile est typiquement égal ou inférieur au micromètre.

Lorsque le rayon des gouttes d'huile est inférieur au micromètre, la quantité d'huile déposée sur la tôle est extrêmement faible, et ce malgré les hypothèses maximalistes qui ont pu être faites.

Cependant, lorsque le rayon des gouttes est supérieur au micromètre, la quantité d'huile entrant commence à devenir véritablement importante. Une étude visant à déterminer la quantité maximale d'huile que la tôle est capable de fixer permettrait peut-être de relativiser ceci. En effet, l'hypothèse n° 3 paraît ici trop forte. Sans compter le fait que la valeur prise pour la vitesse d'impact correspond, selon toute vraisemblance, à un véritable maximum.

En effet ici la vitesse d'impact a été prise égale à 30  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , ce qui correspond en réalité à la vitesse du liquide en sortie de buse ( $V_{sb}$ ). Or comme il y a formation d'un cône d'aspersion (la surface d'impact  $S_i$  étant bien supérieure à la section de la buse  $S_b$ ) si on considère que le

(3.46) liquide ne se fractionne pas alors :  $V_i = \frac{S_i}{S_b} V_{sb}$ . Mais comme rien ne nous dit que le liquide ne se fractionne pas, le choix a été fait de donner à la vitesse d'impact la vitesse maximale qui pouvait lui être affectée. En conséquence l'épaisseur du film formé est surévaluée.

### **1.5. En application directe : vitesse de première restriction :**

Nous nommons ainsi la vitesse à partir de laquelle la quantité d'huile déposée sur la tôle devient inférieure à ce que prendrait l'emprise dans le cadre d'une lubrification à l'huile entière suralimentée. Ainsi pour cette vitesse limite, le plate-out n'est plus suffisant pour alimenter seul le contact.

$$(3.47) \quad \begin{cases} H_{\text{lim}} = \frac{2\phi_0\rho_h r_g^2 V_i}{9\mu_c} \\ h_{cp} = 3\mu_d U \frac{\Gamma}{1 - e^{-\Gamma\sigma}} \sqrt{\frac{2R}{\alpha e_c}} \end{cases} \Rightarrow U_{\text{pr}} = \frac{2\phi_0\rho_h r_g^2 V_i}{27\mu_c\mu_d} \frac{1 - e^{-\Gamma\sigma}}{\Gamma} \sqrt{\frac{\alpha e_c}{2R}}, \text{ avec } U \text{ la vitesse de la tôle}$$

La courbe nommée  $H_{\text{passante}}$  correspond à l'épaisseur du film dans le cas où le système a comme ménisque un  $h_m = H_{\text{lim}}$ . En adaptant la formule (1.78), on obtient :

$$(3.48) \quad H_{\text{passante}} = H_{\text{lim}} \left( K_{11} - \sqrt{K_{11}^2 - 1} \right) \text{ avec } K_{11} = 1 + \frac{H_{\text{lim}}}{2.h_{cp}}$$

(3.49)

$$\left\{ \begin{array}{l} r_g = 10^{-6} \text{ m} \\ R = 0,1 \text{ m} \\ D = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \\ l = 0,1 \text{ m} \end{array} \right.$$

Les autres valeurs sont les valeurs de référence  
 $\Rightarrow U_{pr} = 0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

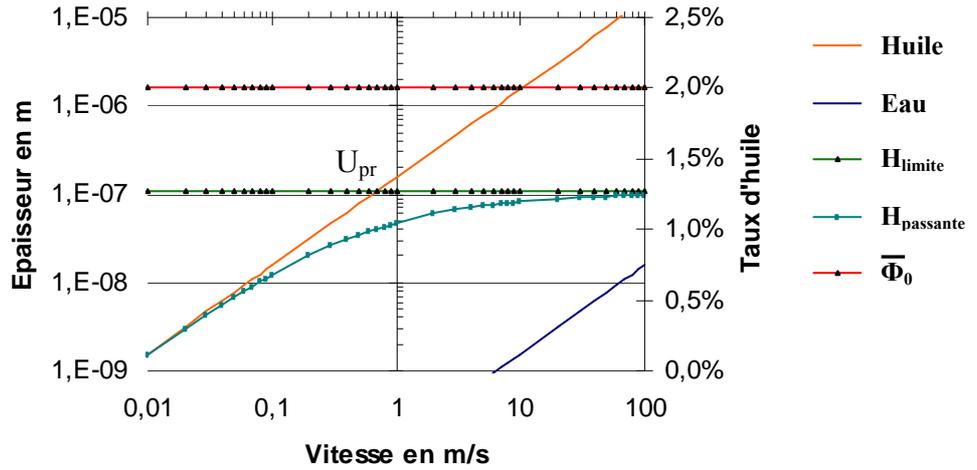


Figure n°3.14 : Mise en relation des besoins de l'emprise en huile entière et de l'épaisseur du film d'huile déposé sur la tôle. Le débit d'émulsion étant ici considéré comme grand, le taux d'huile disponible dans le volume de l'émulsion pourra raisonnablement être considéré comme constant, égal à sa valeur initiale.

## 2. Destruction du plate-out :

Les causes pouvant être à l'origine de la dégradation du plate-out sont nombreuses. Il est cependant fort difficile de dire laquelle est prépondérante.

### 2.1. Force centrifuge

Avec l'augmentation de la vitesse du cylindre, l'huile qui s'était déposée sur celui-ci finit par être éjectée sous l'effet de la force centrifuge. Ce phénomène sera d'autant plus accentué que la vitesse du cylindre sera grande, diminuant d'autant l'épaisseur du film résiduel.

### 2.2. Entrée dans le mur d'eau

La tôle pénètre dans un mur d'eau en entrée d'emprise : cela peut aussi conduire à une érosion du film préformé. Cette érosion sera a priori d'autant plus importante que la vitesse (et donc la violence de l'impact) sera grande.

### 2.3. Diminution du grammage (en application directe)

Avec l'augmentation de la vitesse, la quantité d'huile envoyée par m<sup>2</sup> de tôle diminue. Nous pensons que nous avons là une des meilleures explications à une baisse de l'épaisseur aux vitesses moyennes, dans la configuration du laminage. Nous détaillons donc évaluation de la lacune d'alimentation en huile pouvant en résulter.

Soient  $\phi_0 D / l U$ , le volume d'huile envoyé par mètre carré de tôle (l représente la largeur de la tôle, et D le débit d'émulsion). Pour un faible débit d'aspersion, lorsque la vitesse de défilement de la tôle est grande, la quantité d'huile ainsi projetée conduit à former un film dont l'épaisseur

(3.50) est inférieure à  $H_{lim}$ . Soit  $U_{dr}$  (vitesse de deuxième restriction) cette vitesse, au-delà de laquelle nous considérerons que toute l'huile envoyée se dépose sur la tôle :  $U_{dr} = \frac{\phi_0 D}{l H_{lim}}$

Deux cas sont alors possibles :

(3.51) Lorsque  $U < U_{dr}$  :  $h_{pl} = H_{lim}$  et  $\bar{\phi}_0 = \phi_0 \frac{D - U l E_{lim}}{(1 + \phi_0) D - U l E_{lim}}$

(3.52) Lorsque  $U > U_{dr}$  :  $h_{pl} = \frac{\phi_0 D}{U l}$  et  $\bar{\phi}_0 = 0$

$\bar{\phi}_0$  représente le taux d'huile de l'émulsion déposée, après qu'une partie de son huile s'est fixée sur la tôle.

**Vitesse de croisement :**

Nous nommons ainsi la vitesse pour laquelle le plate-out seul n'est plus suffisant pour alimenter l'emprise en huile pure :

(3.53) Lorsque  $U_{pr} < U_{dr}$  : 
$$\begin{cases} h_{pl} = H_{lim} \\ h_{cp} = 3\mu_d U \frac{\Gamma}{1 - e^{-\Gamma\sigma}} \sqrt{\frac{2R}{\alpha e_c}} \end{cases} \Rightarrow U_{cr} = U_{pr} = \frac{2\phi_0 \rho_h r_g^2 V_i}{27\mu_c \mu_d} \frac{1 - e^{-\Gamma\sigma}}{\Gamma} \sqrt{\frac{\alpha e_c}{2R}}$$

(3.54)  $\begin{cases} R = 0,1 m \\ D = 4.10^{-6} m^3.s^{-1} \\ l = 0,1 m \end{cases}$   
 Les autres valeurs sont les valeurs de référence  
 $\Rightarrow \begin{cases} U_{dr} = 7,5 m.s^{-1} \\ U_{pr} = 7,5.10^{-2} m.s^{-1} \end{cases}$

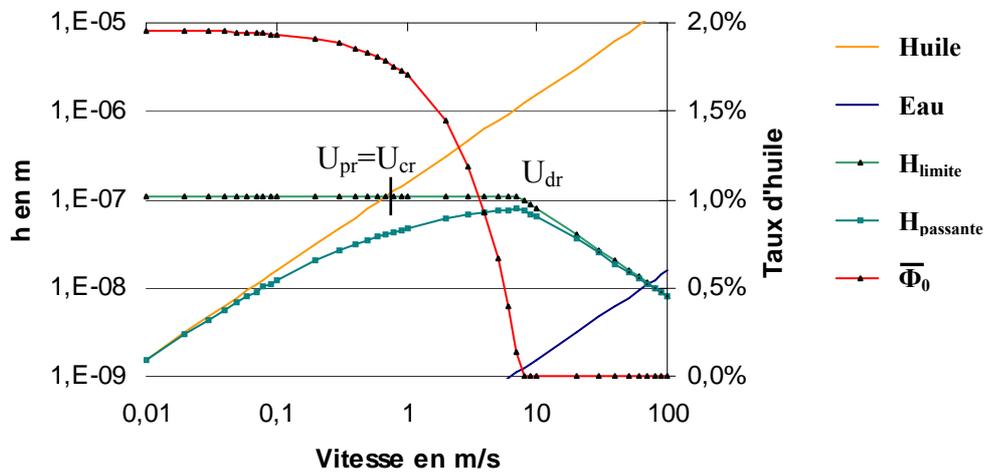


Figure n°3.15 : Evolution en fonction de la vitesse, de l'épaisseur du film d'huile déposé sur la tôle et du taux d'huile de l'émulsion après impact. Mise en relation avec les besoins en huile de l'emprise.

(3.55) Lorsque  $U_{pr} > U_{dr}$  :

$$\begin{cases} h_{pl} = \frac{\phi_0 D}{Ul} \\ h_{cp} = 3\mu_d U \frac{\Gamma}{1 - e^{-\Gamma\sigma}} \sqrt{\frac{2R}{\alpha e_c}} \end{cases} \Rightarrow U_{cr} = \sqrt{\frac{\phi_0 D}{3l\mu_d} \frac{1 - e^{-\Gamma\sigma}}{\Gamma} \sqrt{\frac{\alpha e_c}{2R}}}$$

(3.56)

$$\begin{cases} r_g = 10^{-5} m \\ R = 0,1 m \\ D = 4.10^{-6} m^3 \cdot s^{-1} \\ l = 0,1 m \end{cases}$$

Les autres valeurs sont les valeurs de référence

$$\Rightarrow \begin{cases} U_{pr} = 7,5 m \cdot s^{-1} \\ U_{dr} = 7,5 \cdot 10^{-2} m \cdot s^{-1} \end{cases}$$

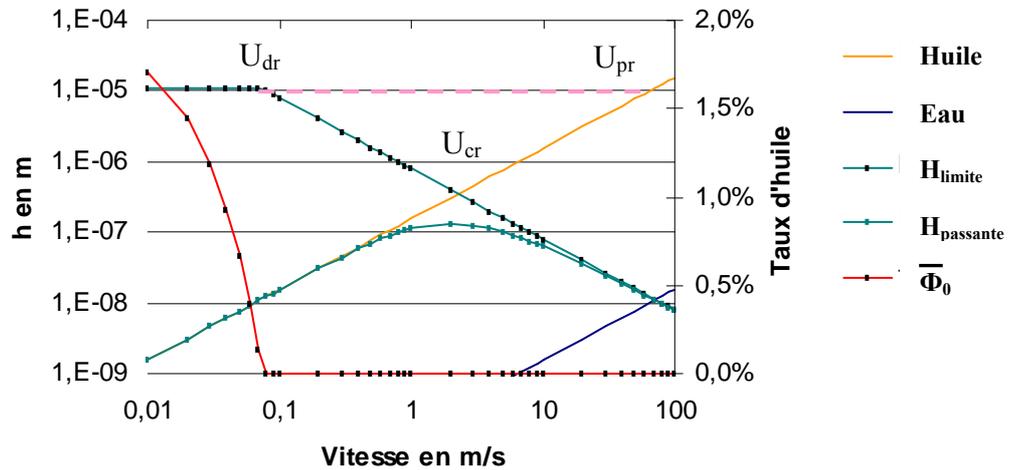


Figure n°3.16 : Evolution en fonction de la vitesse, de l'épaisseur du film d'huile déposé sur la tôle et du taux d'huile de l'émulsion après impact. Mise en relation avec les besoins en huile de l'emprise.

Dans tous les cas présentés, il semble qu'aux vitesses les plus basses, le plate-out est en mesure de fournir une quantité d'huile largement supérieure aux besoins de l'emprise, il est suffisant pour permettre la formation d'une réserve d'huile. Dans les conditions utilisées ci-dessus à titre de démonstration, une baisse de l'épaisseur passante apparaît par contre à des vitesses de quelques m/s, domaine qui correspond bien aux mesures de frottement en laminage de Reich.

Au delà de la forme, toutes les hypothèses avancées ont ceci de commun : elles abordent le problème sous l'angle de la sous-alimentation. En effet, si l'épaisseur décroît, c'est selon ces hypothèses, parce que la quantité d'huile apportée au système est plus faible que ce que prendrait l'emprise si on lui en apportait davantage. Les résultats des figures n°3.15 et n°3.16 ont été obtenus avec un modèle simplifié de sous-alimentation (analogue à la version simplifiée du modèle de Wilson), ce qui fait que l'on n'observe pas la recroissance de l'épaisseur au-delà de  $U_{c2}$ . Dans la suite, nous allons coupler notre estimation du plate-out avec le modèle complet, afin de construire une approche satisfaisante sur l'ensemble du domaine de vitesse intéressant.

Nous constatons enfin que, au moins lorsque les débits d'aspersion sont grands, de l'huile reste disponible dans le volume de l'émulsion après déposition du film "plate-out". Cette huile peut naturellement être « récupérée » et contribuer à la formation (ou au renforcement) de la réserve d'huile. Cela peut se faire via la mise en place d'un mécanisme hydrodynamique de type Szeri-Wilson (voir chapitre n°2)

### 3. Couplage Plate-out – Szeri – Wilson

Avant de parler du couplage, Plate-Out – Szeri – Wilson, il convient de dire un mot sur ce que pourrait être le couplage Plate-Out – Wilson. Une telle démarche permettra de simplifier l'approche, rendant ainsi plus aisée la prise en compte de l'interaction des trois mécanismes.

#### 3.1. Couplage Plate-Out – Wilson :

*1<sup>ère</sup> phase : Lorsque  $h_{pl} > h_{\text{huile pure}}$  :*

Dans ce cas, où le plate-out apporte plus d'huile que l'emprise n'en souhaite avoir, le film lubrifiant (pour peu que  $h_m$  ne soit pas trop petit) aura pour épaisseur, l'épaisseur de l'huile pure. Ainsi, les phénomènes de concentration hydrodynamiques n'entreront pas en jeu.

*2<sup>ème</sup> phase : Lorsque  $h_{pl} < h_{\text{huile pure}}$  :*

Dans cet autre cas, les mécanismes hydrodynamiques vont se mettre en place. Pour prendre en compte l'existence des films préexistants (plate-out) deux visions peuvent se concevoir :

**Approche additive** : une première tentative visant à intégrer les films préexistants pourrait tout simplement consister à additionner l'épaisseur du plate-out à l'épaisseur hydrodynamique. Cela reviendrait à considérer que les films d'huile sont si solidement accrochés à la tôle et au rouleau qu'ils se comportent comme s'ils faisaient partie intégrante de la tôle et du rouleau. Dans ce cas, entre les deux vitesses critiques  $U_{c1}$  et  $U_{c2}$ , selon l'approximation (2.113) (et avec un  $\phi_{inv}=1$ ) l'expression simplifiée de  $h_{cp}$  est donc :  $h_{cp}^{aa} = h_{pl} + 2Cr_g \phi_0$ . Avec  $h_{pl}$  l'épaisseur du plate-out. Cette vision est bien évidemment très optimiste, et cette épaisseur constitue de fait un maximum.

(3.57)

**Approche hydrodynamique** : une autre approche consisterait en effet à intégrer la quantité d'huile déposée sur la tôle en modifiant le degré d'huile initial. Ceci reviendrait à estimer que toute l'huile déposée est réémulsifiée et participe au phénomène hydrodynamique : phénomène hydrodynamique devenant par conséquent le seul mécanisme opérant.

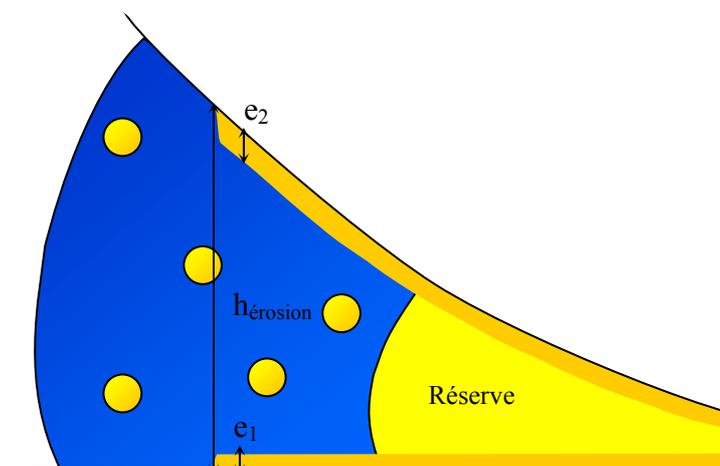


Figure n°3.17 : Plus le phénomène d'érosion à lieu précocément, moins il contribue à augmenter le taux initial d'huile.

(3.58) Soit :  $h_{pl}$  (avec  $h_{pl} = e_1 + e_2$ ) l'épaisseur du plate-out. Soit  $h_{\text{érosion}}$ , l'endroit où toute l'huile déposée sera ré-émulsifiée se retrouvant ainsi au cœur de l'émulsion. Cette huile ré-émulsifiée va alors se retrouver sous forme de gouttes. Dans l'hypothèse où ces nouvelles gouttes ont les mêmes propriétés que les autres gouttes (notamment le même rayon) : le nouveau taux d'huile  $\phi'_0$  à considérer a pour expression :

$$(3.59) \quad \phi'_0 = \kappa + (1 - \kappa)\phi_0 \quad \text{avec} \quad \kappa = \frac{h_{pl}}{h_{\text{érosion}}}$$

(3.60) Lorsque :  $\kappa = 0$  alors  $\phi'_0 = \phi_0$

(3.61) Lorsque :  $\kappa = 1$  alors  $\phi'_0 = 1$

Ainsi, tous les taux, de  $\phi_0$  à 1, peuvent être atteints : tout dépend de l'endroit où l'huile déposée se voit ré-émulsifiée. La question qui se pose alors est de savoir à quel endroit ce film est érodé.

Si on admet que les gouttes peuvent s'accrocher aux surfaces et y rester fixées, alors on est plus ou moins contraint d'admettre que l'érosion ne peut avoir lieu avant l'endroit  $h=2.C.r_g$ . En effet plus l'on se place en amont du lieu où s'amorce le mécanisme de Wilson, et moins l'effet du terme de Poiseuille (seul responsable de l'érosion) se fait ressentir sur le film d'huile déposé.

Or considérer que  $h_{\text{érosion}}=2.C.r_g$  revient à doublement sous-estimer l'influence du plate-out. D'une part, car  $h_{\text{érosion}}$  pourrait être encore inférieur à  $h=2.C.r_g$ . D'autre part, parce que le simple fait de considérer qu'absolument toute l'huile qui s'est au préalable déposée sur les parois est ré-émulsifiée est une vision bien pessimiste.

$$(3.62) \quad \text{Bref, dans ce cas : } \phi'_0 = \frac{h_{pl}}{2Cr_g} + \left(1 - \frac{h_{pl}}{2Cr_g}\right)\phi_0$$

Entre les deux vitesses critiques  $U_{c1}$  et  $U_{c2}$ , selon l'approximation (2.113) (et avec un  $\phi_{\text{inv}}=1$ ) l'expression simplifiée de  $h_{cp}$  selon l'approche hydrodynamique (ah) est donc :

$$(3.63) \quad h_{cp}^{ah} = h_{pl} + (2Cr_g - h_{pl})\phi_0$$

Cette expression de  $h_{cp}$  donne une valeur inférieure à celle trouvée avec l'approche additive. La différence,  $h_{pl}\phi_0$  (minime – voir **figure n°3.18**) s'explique par le fait que selon les hypothèses (de l'approche additive ou hydrodynamique) le raisonnement ne conduit pas à la valeur de  $h_{cp}$  mais seulement à des estimations.

(3.64) Dans le cas où  $2Cr_g \gg h_{pl}$ , alors :  $h_{cp}^{ah} \approx h_{pl} + 2Cr_g\phi_0$ . On retrouve bien l'expression obtenue dans le cadre de l'approche additive.

(3.65) Dans le cas où  $2Cr_g \ll h_{pl}$ , alors :  $\begin{cases} h_c^{ah} = h_{pl}(1 - \phi_0) \\ h_c^{aa} = h_{pl} \end{cases}$ . Pour une valeur faible de  $\phi_0$ , les deux expressions donnent bien des résultats analogues.

$$(3.66) \begin{cases} C = 1 \\ r_g = 10^{-6} m \\ \phi_0 = 2 \% \end{cases}$$

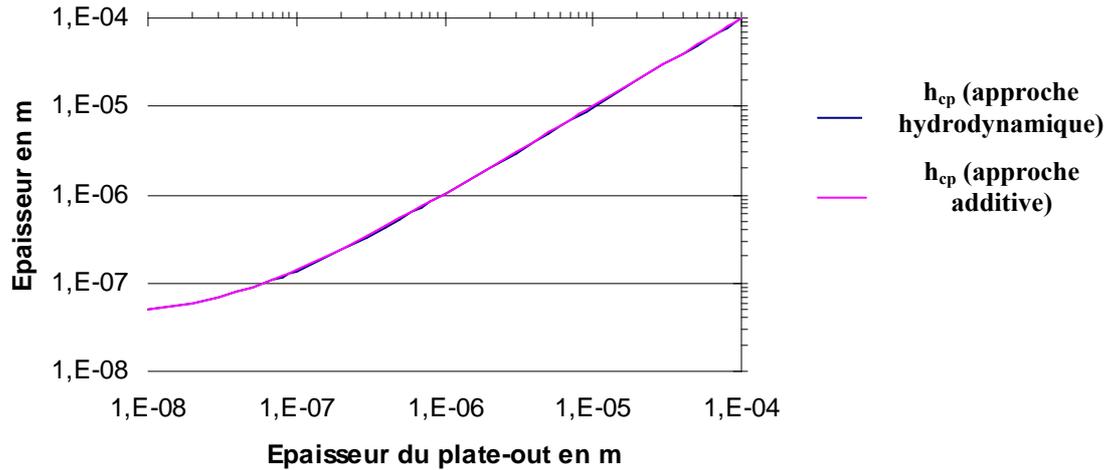


Figure n° 3.18 : pour les faibles valeurs de  $h_{pl}$  peu de différences existe entre  $h_{cp}(aa)$  et  $h_{cp}(ah)$ . Pour les valeurs de  $h_{pl}$  importantes, l'erreur relative est bornée par  $\phi_0$ .

### 3.2. Couplage Plate-Out – Szeri – Wilson :

Le raisonnement tenu, aussi bien dans l'approche additive que dans l'approche hydrodynamique, peut sans difficulté être refait dans le cadre d'un modèle couplé Plate-Out – Szeri – Wilson.

En effet, selon l'approche additive, vision optimiste des choses, les films d'huile sont si solidement accrochés à la tôle et au rouleau qu'ils se comportent comme s'ils faisaient partie intégrante de la tôle et du rouleau. Cela conduit pour  $h_{cp}$  à l'expression suivante :

$$(3.67) \quad h_{cp} = h_{pl} + h_{cp,hydro}, \text{ avec } h_{cp,hydro} \text{ l'épaisseur obtenue lors de l'utilisation du modèle couplé Szeri – Wilson décrit en } \text{partie IV du chapitre n°2.}$$

Selon l'approche hydrodynamique : si les gouttes d'huile peuvent assurer la jonction entre les deux surfaces antagonistes (en  $h=2.C.r_g$ ) alors le film d'huile déposé sur la tôle et le cylindre ne devrait pas être érodé avant l'endroit où  $h=2.C.r_g$ , puisque le terme de Poiseuille (responsable de l'érosion) y est moins élevé.

$$(3.68) \quad \text{Par conséquent : } h_{cp} = h_{cp,hydro}^{S-W} \text{ en remplaçant } \phi_0 \text{ par } \phi'_0 \text{ avec } \phi'_0 = \kappa + (1 - \kappa)\phi_0 \text{ et } \kappa = \frac{h_{plate-out}}{2Cr_g}$$

#### Résultats ...

En sortie, la formule donnant la nouvelle concentration en huile, à partir de celle obtenue grâce au modèle couplé hydrodynamique Szeri-Wilson est :

$$(3.69) \quad \phi'_{cp} = \bar{\kappa} + (1 - \bar{\kappa})\phi_{cp} \text{ avec } \bar{\kappa} = \frac{h_{plate-out}}{h_{c,hydro}^{S-W}}$$

La figure n°3.19 montre bien que pour un plate-out conséquent, la réévaluation d'un taux d'huile en sortie (même s'il est faible : ici 10 % par exemple) peut être tout à fait spectaculaire. Lorsque la valeur du plate-out devient égale ou supérieure au  $h_{hydro}$ , alors le taux d'huile est normalement maximum égal à 1.

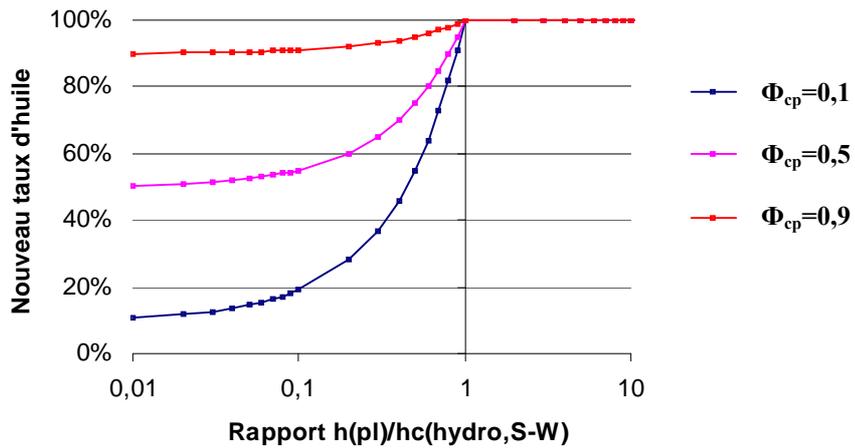
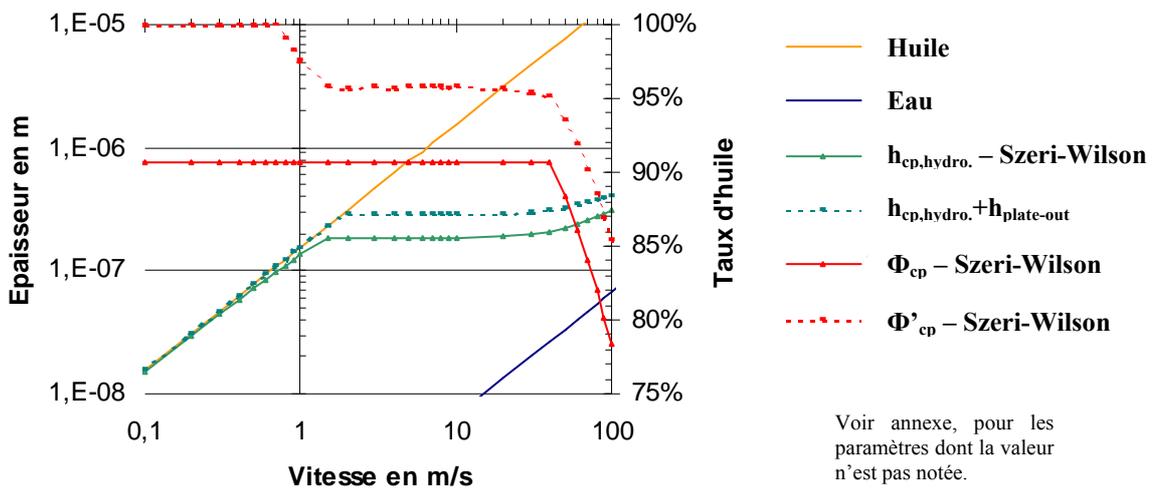


Figure n° 3.19 : plus le plate-out est grand devant  $h_{cp}$ , et plus l'augmentation du taux d'huile en entrée du contact sera élevée.

Ici, la valeur du plate-out a été prise égale à  $10^{-7}$  m, conformément au résultat obtenu pour ce type de goutte ( $r_g=10^{-6}$  m) dans l'étude faite en partie I.

Dans le modèle couplé Plate-out – Szeri – Wilson , les grandes tendances de la lubrification sont bien retrouvées (grâce à la pertinence des équations de Wilson). Ce qui change, par rapport au modèle de Wilson (et d'une manière plus générale par rapport au modèle Szeri-Wilson) c'est que le plate-out contribue à apporter une quantité d'huile supérieure.

(3.70)  $R = 0,3 \text{ m}$   $\alpha = 0,1$   $\Gamma = 10^{-8} \text{ Pa}$   $\sigma = 2.10^8 \text{ Pa}$   $\phi_0 = 5\%$   $h_{pl} = 10^{-7} \text{ m}$



Voir annexe, pour les paramètres dont la valeur n'est pas notée.

Figure n° 3.20 : le plate-out réévalué à la hausse, aussi bien l'épaisseur du film que le taux d'huile.

### Dans le cas où le grammage diminue

Afin de bien montrer que cette décroissance peut être retrouvée, le dernier phénomène est à titre d'exemple illustré en figure n° 3.21.

- (3.71) Pour calculer le  $h_{cp}$  la formule suivante a été utilisée :  $h_{cp} = h_{pl} + 2Cr_g\phi_0 + h_{eau}$ . Il s'agit de la formule (3.57) à laquelle a été ajoutée le  $h_{eau}$ . Cette formule prend en fait en compte le plate-out ainsi qu'une variante à peine remaniée de la version simplifiée du mécanisme de Wilson (décrite au chapitre n°2 § II.6.). Comme attendu, aux basses vitesses, l'épaisseur ainsi calculée est supérieure à l'épaisseur de l'huile pure. Dans ce cas l'épaisseur de l'huile pure a été substituée à l'épaisseur calculée.

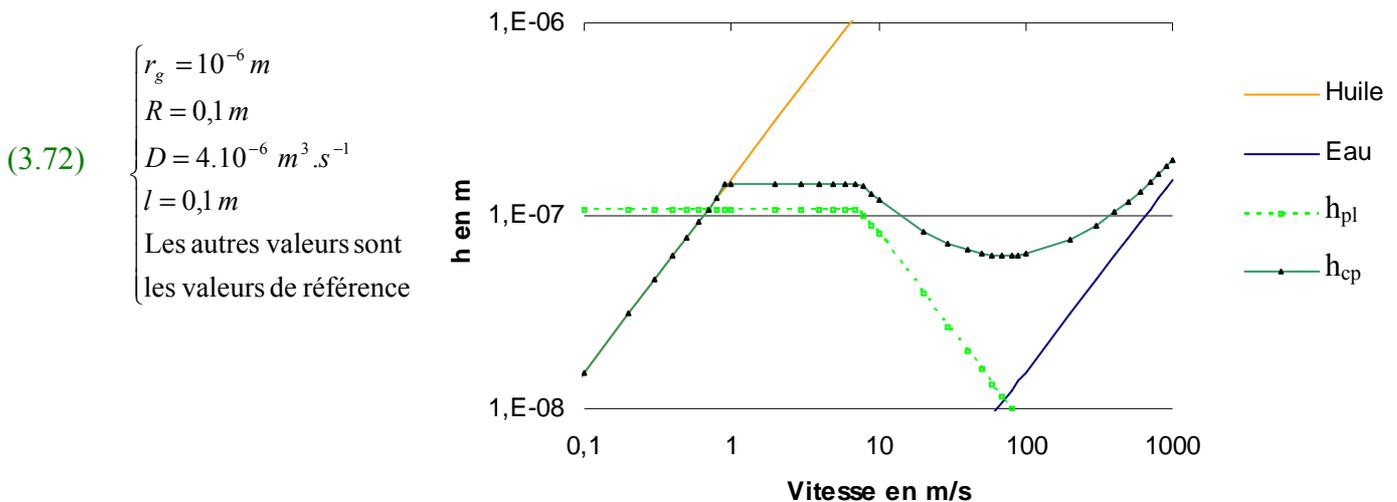


Figure n° 3.21 : Le mécanisme hydrodynamique de Wilson compense un temps la chute du plate-out.

Jusqu'à  $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  le plate-out seul amène suffisamment d'huile pour qu'aucune différence ne soit perceptible entre l'huile entière et l'émulsion. A partir de  $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  le plate-out seul n'est plus suffisant pour masquer ces différences. Le mécanisme hydrodynamique de Wilson se met alors en place et empêche le décrochage de la courbe d'épaisseur jusqu'à la vitesse de  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . De  $1$  à  $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , il y a un palier suivi d'un décrochage. Ce décrochage est dû, selon cette hypothèse à la chute du plate-out, consécutive à la diminution du grammage. La tendance finira par s'inverser, l'épaisseur recommençant à croître pour les hautes vitesses, parce que de plus en plus d'eau pénètre dans l'emprise.

## 4. Conclusion

Cette étude sommaire du plate-out vise à dégrossir le problème et à poser des questions que l'on veut croire intéressantes. Aussi, dans le développement précédent, ont été abordés divers problèmes, comme par exemple, la diminution du grammage avec l'augmentation de la vitesse ; ou encore la capacité qu'ont les gouttes d'huile de traverser le film d'émulsion pour rejoindre la tôle et s'y fixer.

Cette approche a notamment conduit à nous demander de quelle manière la formation du plate-out pouvait être influencée par des actionneurs potentiels, comme le débit, la vitesse d'impact, la taille des gouttes d'huile.

Une fois ce travail réalisé, une manière simple visant à tenir compte de la présence du plate-out dans la lubrification par émulsion a été exposé : le modèle couplé plate-out – Szeri – Wilson.

### Conclusion du chapitre 3

Lorsque  $U > U_{c1}$ , il a été montré que pour certaines émulsions, l'épaisseur du film lubrifiant décroissait avec l'augmentation de la vitesse. Il semble d'ailleurs qu'il en soit ainsi pour l'émulsion testée à l'IRSID (voir fig. n°0.8) dans la gamme de vitesse choisie. Cette décroissance de l'épaisseur conduit inévitablement à accroître le taux de plateaux et donc la valeur du frottement. Les explications possibles sont nombreuses et il était important d'en établir une liste, malheureusement pas exhaustive. De plus le bon choix dans cette liste n'est pas forcément connu et prouvé.

Ce chapitre, il est vrai, pose au fond plus de questions qu'il n'apporte de réponses claires et définitives. Il nous semble cependant que les explications les plus probables de cette décroissance (qui pourrait bien être la cause de l'existence de  $U_{c2}$ ) ont bel et bien été identifiées:

- divers mécanismes liés aux interactions huile - eau et fluides - parois: érosion ou désancrage des "piliers" d'huile, fractionnement des gouttes d'huile.
- diminution du grammage d'huile fournie, conduisant à une baisse du plate-out identifié comme une des composantes majeures de la lubrification;

En effet, le modèle de Wilson ne prend pas en compte le fait que les gouttes d'huile peuvent se fractionner sous l'effet du cisaillement en entrée d'emprise, à fort nombre capillaire (proportionnel à la vitesse).

De même (dans le cas où les gouttes d'huile restent entières) a été négligée la capacité plus ou moins grande que ces gouttes ont de s'accrocher aux surfaces. Or ce phénomène d'adhésion est capital, car les gouttes d'huile doivent faire face au reflux de l'eau, qui risque de les décrocher d'autant plus que la vitesse augmente. Le paramètre  $C$  cherche à en tenir compte, mais quelle valeur choisir ?

Le cas où les gouttes d'huile restent entières et solidement ancrées aux surfaces antagonistes a également été évoqué. Dans cette situation, les gouttes d'huile forment des piliers qui peuvent être érodées par le reflux de l'eau. Avec l'augmentation de la vitesse, la force d'érosion augmente.

Bref, autant d'idées pour améliorer l'analyse du mécanisme hydrodynamique de Wilson pour expliquer qu'une décroissance de l'épaisseur s'observe aux fortes vitesses. Mais elles ne pourront devenir modèle quantitatif que par de multiples analyses fines de physiques complexes.

Une autre idée a été d'expliquer le phénomène de décroissance de l'épaisseur du film lubrifiant par une altération du plate-out. Pour cela il fallait au préalable évaluer (ou tenter d'évaluer) la quantité d'huile effectivement déposée sur la tôle lors de l'aspersion. Ce travail a permis de mettre en lumière l'influence d'un grand nombre de paramètres, qui à terme pourraient bien devenir des actionneurs. On citera à titre d'exemple, le choix délicat de la vitesse d'impact : les gouttes d'huile doivent en effet être dotées d'une vitesse suffisamment grande pour traverser ce film d'émulsion, afin de rejoindre la tôle et de s'y fixer, sans pour autant éroder le film d'huile déjà présent.

Entre autres causes possibles de la dégradation du plate-out avec l'augmentation de la vitesse, a été évoqué la faiblesse du débit d'alimentation en huile et la diminution du grammage qui

pourrait en résulter. On sait bien que tant le débit d'arrosage que la concentration initiale de l'émulsion sont des paramètres attentivement considérés par les lamineurs. Asservir le débit à la vitesse de laminage, de manière à maintenir un grammage fourni constant, pourrait être une réponse au problème que pose la vitesse critique avec son frottement qui augmente - osus réserve que le temps disponible pour la déposition du film soit suffisant, ce qui demande des émulsions très instables. Sur certains laminoirs travaillant en application directe, les rampes d'arrosage peuvent d'ailleurs être plus ou moins éloignées de l'emprise, de manière à jouer sur ce temps disponible.

Pour tenir compte de l'existence des films préformés, une méthode a été proposée. Elle consiste en une simple addition de l'épaisseur du plate-out à l'épaisseur obtenue par le modèle hydrodynamique couplé Szeri-Wilson. Bien que très simple, cette méthode permet de décrire qualitativement, les principales observations expérimentales.

Les considérations précédentes touchent plutôt à la configuration "application directe". Dans le cas de la recirculation, un phénomène dont nous n'avons pas parlé jusqu'ici tient à la grande quantité d'huile présente sur la tôle jusqu'assez loin en amont d'emprise, "mare de lubrifiant" dans laquelle des phénomènes turbulents pourraient bien se produire, dont l'impact sur la lubrification reste à examiner.