

Paramètres influençant la lubrification par émulsion

1. Influence de la vitesse

1.1. Evolution de l'épaisseur :

Aux basses vitesses : Formation d'une réserve d'huile ...

Expérience de Zhu [25]: Le système étudié par Zhu est un cylindre tournant au-dessus d'un plan dans les conditions de l'Elasto-Hydrodynamique (EHD). Grâce à un système optique il a regardé ce qui se passait dans l'emprise. Aux basses vitesses, il constate qu'il y a formation d'une réserve d'huile : « oil-pool ». Cette observation permet de résoudre en partie le paradoxe énoncé dans l'introduction. En effet, grâce à la présence de cette réserve (fig. n°1.14), le contact est alimenté en huile, et c'est bien l'huile qui lubrifie. L'eau qui se trouve tout autour va quant à elle jouer le rôle capital de thermorégulateur. En effet, en lubrification, la viscosité est le paramètre essentiel. Or la déformation plastique de la tôle libère de l'énergie thermique qui va échauffer le lubrifiant. Sous l'effet de cette augmentation de température, l'huile voit chuter sa viscosité, donc ses capacités lubrifiantes. L'eau, liquide de grande capacité calorifique, va modérer ces hausses de température et ainsi éviter l'altération des propriétés lubrifiantes de l'huile.

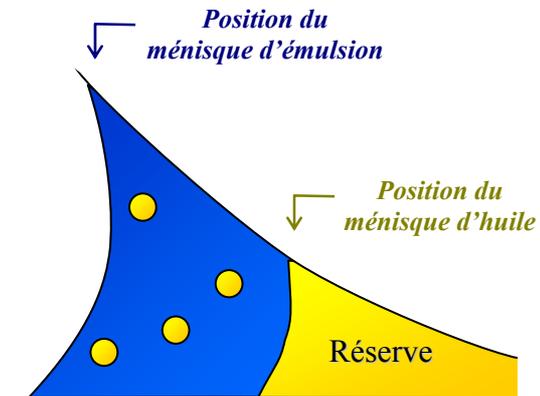


Figure n°1.14 : formation d'une réserve d'huile en amont de l'emprise. L'huile se trouve au niveau du contact où elle joue le rôle de lubrifiant. L'eau se trouve tout autour et joue le rôle de thermorégulateur.

En résumé, une émulsion d'huile dans l'eau, homogène, constituée à 98 % d'eau est envoyée sur la tôle et les cylindres. Par un certain mécanisme, l'huile seule se retrouve au niveau du contact, où elle va jouer son rôle de lubrifiant. L'eau se place tout autour, et empêche les hausses de température qui pourraient gêner l'action de l'huile.

Aux hautes vitesses : Tout se complique...

Le paradoxe n'est cependant qu'en partie résolu, en partie seulement, car l'expérience de Zhu montre que la réserve d'huile n'existe que pour les basses vitesses (fig. n°1.15-a). En effet, la réserve diminue avec l'augmentation de la vitesse, et finit même par disparaître pour une certaine vitesse critique U_{c1} . Lorsque la réserve peut se constituer, aux vitesses les plus basses, l'épaisseur du film né de l'émulsion égale l'épaisseur du film né de l'huile entière.

Ensuite, dès que la réserve disparaît (lorsque la vitesse critique U_{c1} est atteinte) s'amorce un phénomène de transition : l'épaisseur du film d'émulsion stagne puis décroît. Dès lors la question suivante se pose : est-ce que cette vitesse critique U_{c1} est la vitesse critique à l'origine de tous nos problèmes ? rien n'est moins sûr et bien évidemment, nous ne manquerons pas d'en discuter (voir § 1.3)

Cette transition s'achève lorsque l'épaisseur reprend, à l'image de l'huile et de l'eau, une croissance proportionnelle à $U^{2/3}$ (fig. n°1.15-b). Un tel comportement montre que dans cette zone le comportement de l'émulsion est lui aussi gouverné par un mécanisme de nature hydrodynamique.

Il est intéressant de remarquer que la courbe de l'émulsion présente vis à vis de l'eau pure un certain décalage, traduisant l'existence d'une différence d'épaisseur. Ce décalage existe bel et bien, même s'il est ici difficile à appréhender dans le sens où la courbe d'épaisseur n'a pas été établie de la même manière pour l'huile (contact linéique) et pour l'eau (contact ponctuel). Il est d'autant plus difficile à appréhender que les épaisseurs obtenues en contact ponctuel sont moins grandes que celles obtenus en contact linéique. Ceci car le lubrifiant a dans ce cas une plus grande facilité à s'échapper et a plutôt tendance à contourner le point où l'épaisseur est minimale et la pression élevée. Pour ces raisons ce problème sera de nouveau abordé en § 2.2.

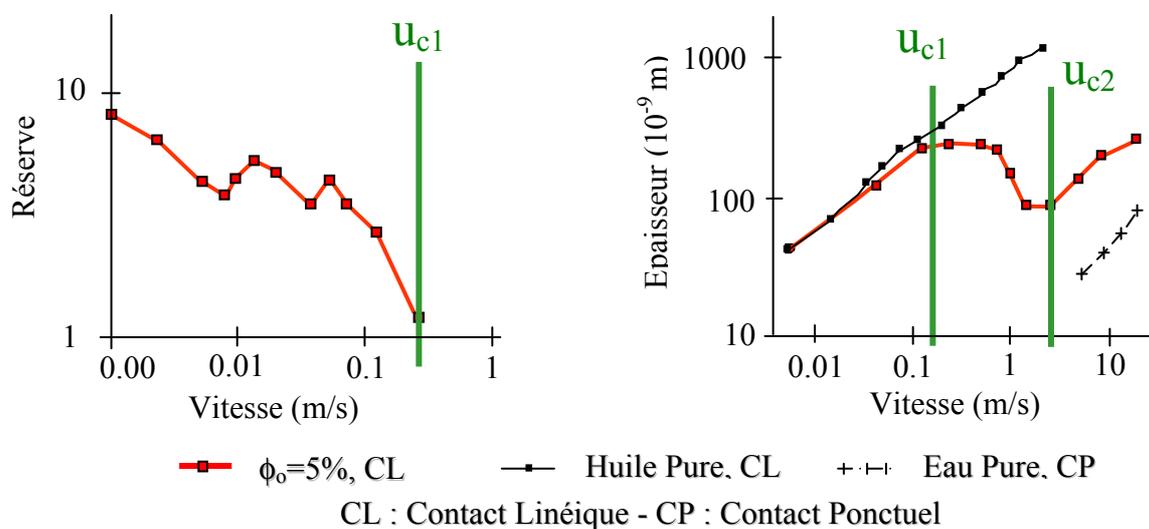


Figure n°1.15-a : la réserve d'huile diminue lorsque la vitesse augmente. Elle finit par disparaître pour une certaine vitesse critique U_{c1} . [25]

Figure n°1.15-b : - Aux basses vitesses : $h_{em} = h_{huile\ pure}$
 - Aux hautes vitesses : h_{em} est du même ordre de grandeur que $h_{eau\ pure}$ [25]

1.2. Evolution du frottement :

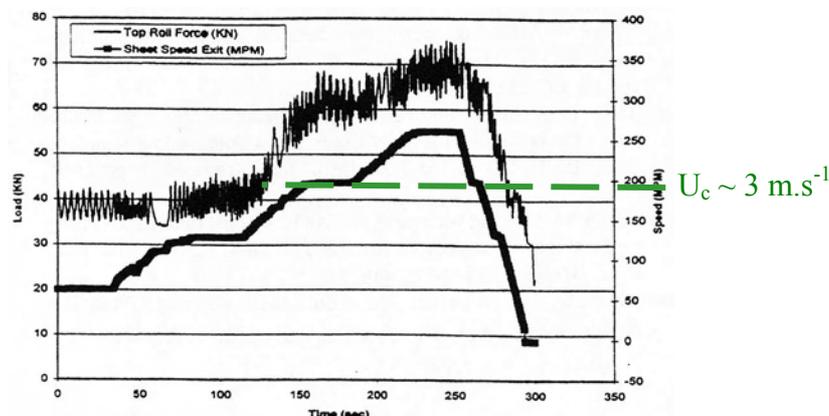


Figure n°1.16 : Avec une concentration initiale de 1,5 %, il existe une vitesse critique U_c , au-delà de laquelle, l'augmentation de la vitesse provoque une hausse du frottement. [26]

Il est désormais temps de parler de l'expérience de Reich [26] qui montre (graphe à l'appui) la fameuse vitesse critique (U_c) déjà présentée dans l'introduction et dont l'existence est à l'origine de ce travail de thèse. L'expérience de laminage de tôles d'aluminium de Reich montre qu'il existe bien une vitesse critique, que nous nommerons donc U_c à partir de laquelle les choses se dégradent (fig. n°1.16). Il a tracé l'évolution de la force de laminage (fonction monotone croissante du coefficient de frottement) pour différentes vitesses en utilisant comme lubrifiant une émulsion dont le taux d'huile est de 1,5 %. Le passage de la première vitesse testée à la deuxième ne change rien au niveau du frottement. Cela prouve que dans un premier temps, l'augmentation de la vitesse est sans incidence sur le frottement. Cependant au-delà de cette vitesse critique (U_c), une augmentation de la vitesse se traduit inexorablement par une hausse du frottement.

1.3. Commentaire personnel.

Deux expériences ont été présentées. L'expérience de Zhu, faite en EHD, montre qu'il existe deux vitesses critiques U_{c1} et U_{c2} . L'expérience de Reich, faite en laminage montre qu'il existe une vitesse critique U_c .

Malheureusement nous n'avons aucun résultat expérimental superposant (en laminage ou en EHD) les courbes d'épaisseur et de frottement. Cela n'est pas sans poser problème.

Tout d'abord, rien ne prouve qu'un même phénomène de bifurcation des courbes d'épaisseur (constatées en EHD pour $U > U_{c1}$) existe dans les conditions réelles de laminage. Cependant, dans le sens où l'étude porte sur le même système (cylindre tournant « au dessus » d'un plan) que seule la valeur de la pression exercée est au fond différente, les résultats en EHD et en laminage ne devraient pas, en toute logique, être si différents que cela. C'est la raison pour laquelle **nous considérerons dans la suite de cette étude** (avec toutes les réserves nécessaires à ce genre d'assertion) **que les résultats de Zhu sont généralisables au laminage**. Il faut noter que les expériences de Zhu et de Spikes (en film complet) ne peuvent au mieux que simuler la zone d'entrée de l'emprise.

Ensuite, nous en sommes ainsi réduit à émettre des hypothèses sur l'origine de l'apparition de la vitesse critique U_c . La plus naturelle consiste à vouloir essayer d'associer U_c à U_{c1} .

L'expérience de Zhu montre en effet qu'il existe une vitesse critique U_{c1} pour laquelle on a un effondrement de la réserve d'huile et une bifurcation des courbes d'épaisseur. Il faut cependant se garder de faire des conclusions hâtives. En effet, le résultat de Zhu présenté (figure n°1.15-a et b) doit être nuancé. Si la chute de la réserve est colossale et manifeste, rien ne permet d'affirmer qu'elle est totale. On pourrait en effet imaginer qu'un reliquat (même tout petit, indétectable) de réserve continue d'exister : hypothèse, on va le voir, pas forcément inintéressante.

Avant de poursuivre il convient de s'arrêter sur un phénomène important qui a trait à l'influence de la chimie. En effet jusqu'à présent le frottement n'a plus ou moins été abordé qu'en terme d'épaisseur de film : plus le film est épais et plus le frottement diminue. Il serait bien évidemment difficile d'en disconvenir, cependant dans le régime mixte il y a des plateaux et le frottement sur ces plateaux est essentiellement gouverné par la chimie (les phénomènes de micro-hydrodynamisme ne seront pas considérés ici).

Afin d'aborder le problème de la nature du liquide entrant et de son influence sur la chimie, introduisons la notion de sous-alimentation. Même si l'emprise a de l'huile en quantité très importante, elle n'absorbe qu'une quantité bien déterminée (proportionnelle au produit de la viscosité de l'huile par le carré de la vitesse). Si la quantité d'huile fournie est inférieure à la quantité que l'emprise aurait naturellement absorbée, alors l'emprise prend moins d'huile et l'épaisseur du film diminue en conséquence. De sorte qu'en jouant sur la quantité de liquide disponible, il est possible d'imposer à un système, pour une vitesse donnée, une même épaisseur de film alors que les liquides considérés ont des viscosités très différentes. Quid du frottement si à épaisseur et vitesse identiques, le film lubrifiant est de l'eau plutôt que de l'huile ? Lorsque $h_t > 3 R_q$, a priori seule l'épaisseur compte. En revanche dans le cadre du régime limite c'est la chimie du lubrifiant qui est importante. En effet le lubrifiant, même s'il est en quantité infime, va imprégner les surfaces et y déposer des agents chimiques (additifs) qui vont faciliter le glissement des surfaces l'une sur l'autre. Dans le cas du régime mixte, si de l'eau venait à entrer dans le contact, l'approvisionnement en additifs (liposolubles) ne serait plus assuré. Leur action sur les plateaux n'aurait ainsi plus cours. Bref, à la nature du liquide entrant (eau ou huile) le frottement risque fort de ne pas être insensible...

Au-delà de U_{c1} , l'expérience de Zhu montre que la réserve d'huile n'est plus détectable. Elle montre également qu'au-delà de U_{c1} , l'épaisseur du film né de l'émulsion et l'épaisseur qui serait obtenue pour l'eau pure, sont du même ordre de grandeur. Ces faits ne nous renseignent en rien sur la nature du liquide qui pénètre dans l'emprise. Il serait donc hâtif à partir de ces seules considérations de conclure, pour $U > U_{c1}$, que la réserve disparaît totalement et que toute l'émulsion (98 % d'eau) passe dans l'emprise. Ce serait d'autant plus hâtif, qu'admettre ceci reviendrait à considérer qu'à haute vitesse en laminage c'est l'eau qui lubrifie. Or compte tenu de sa faible viscosité et des vitesses considérées, l'eau n'est pas un lubrifiant.

1.4. Hypothèse...

Rien ne nous empêche en revanche d'émettre l'hypothèse tout à fait inverse : seule l'huile continue pour un temps à alimenter l'emprise (du moins au-delà de U_{c1} et jusqu'à U_{c2}). Si cette hypothèse n'est pas démontrée (du moins à ce stade de la présentation) elle a l'avantage sur son antagoniste d'être plausible.

Cette hypothèse permet en effet d'expliquer deux phénomènes majeurs, spécifiques de la lubrification par émulsion.

D'une part, elle permet de comprendre pourquoi il est possible de laminer à des vitesses bien supérieures à U_{c1} . En effet, bien après l'apparente disparition de la réserve, l'emprise continue d'être alimentée en huile pure ou quasi-pure.

D'autre part, ceci permet de comprendre pourquoi on peut atteindre avec une émulsion, des vitesses qui ne pourraient être atteintes avec de l'huile entière : En huile entière, l'épaisseur du film (d'huile) est proportionnelle à la vitesse. A partir d'une certaine vitesse, la quantité d'huile passante est tellement importante, que le système est surlubrifié. En effet le film lubrifiant est trop épais, le cylindre patine et n'entraîne plus la tôle. L'émulsion quant-à elle, et selon cette hypothèse, nourrirait l'emprise en huile de manière moins abondante. Ainsi, cette sous-alimentation (à condition qu'elle ne soit pas trop sévère) permettrait d'atteindre des vitesses qui ne pourraient être atteintes par l'huile entière pour cause de surlubrification. Par conséquent, si le taux d'huile reste élevé, la bifurcation des courbes d'épaisseur constitue un atout. Ce ne serait alors pas la « disparition » de la réserve et la bifurcation des courbes d'épaisseur qui serait à l'origine de l'augmentation du frottement, mais un autre phénomène qui reste à découvrir...

2. Influence du taux initial d'huile

2.1. En terme de frottement

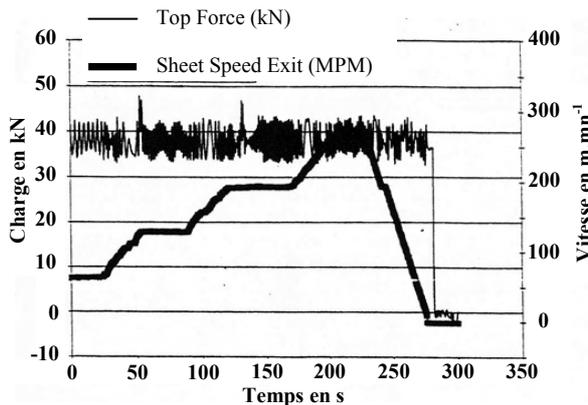


Figure n°1.17-a : Avec une concentration initiale de 4 %, le frottement reste inchangé quelle que soit la vitesse choisie dans la gamme [0 ; 5 m.s⁻¹]. [26]

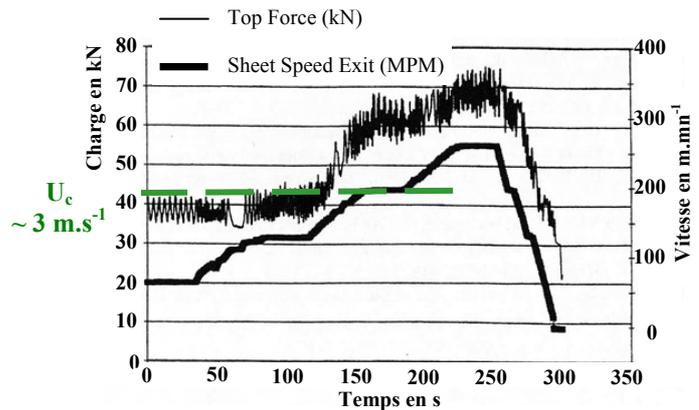


Figure n°1.17-b : Avec une concentration initiale de 1,5 %, il existe une vitesse critique U_c , au-delà de laquelle, l'augmentation de la vitesse provoque une hausse du frottement. [26]

Reich [26] reproduit l'expérience précédemment décrite (§ 1.2.) en utilisant cette fois ci une émulsion dont le taux d'huile n'est plus de 1,5 % mais de 4 %. La montée en vitesse est rigoureusement la même. Pourtant, dans ce cas le frottement reste inchangé pour chacune des différentes vitesses testées. Cela montre qu'une hausse du taux d'huile tend à augmenter la valeur de la vitesse critique U_c .

Il est à noter que pour la première vitesse testée, aucune différence n'est observée au niveau du frottement lorsque sont comparées les deux émulsions aux taux d'huile différents : 1,5 % et 4 %. Cela montre que pour certaines vitesses, avoir 4 %, 10 % ou 100 % d'huile ne change strictement rien au coefficient de frottement. Par conséquent si une émulsion de 2 % donne de bons résultats, il est inutile d'utiliser une émulsion plus chargée en huile : cela augmenterait le coût et éventuellement (si $U > U_{c1}$) le risque de surlubrification.

2.2. En terme d'épaisseur

Zhu [25] en EHD, a tracé l'évolution de l'épaisseur pour deux émulsions aux taux d'huile bien différents. Bien que le taux d'huile ait été multiplié par dix, il y a beaucoup de similitudes entre les deux courbes d'épaisseur de ces deux émulsions (fig. n°1.18).

Aux très basses vitesses, comme attendu, les courbes de l'émulsion se confondent avec la courbe de l'huile pure. Ensuite, et c'est très intéressant, les deux courbes d'émulsion quittent la courbe de l'huile pour la même vitesse. Autrement dit, selon cette expérience le taux d'huile semble être sans influence sur la vitesse critique U_{c1} . Le mot « semble » est ici utilisé à bon escient. En effet l'influence de tel ou tel paramètre ne s'appréhende qu'en recoupant un grand nombre de résultats expérimentaux. La modification de la valeur d'un paramètre peut tout à fait en influencer un autre dont les répercussions insoupçonnées rendront caduques toutes conclusions. Les exemples sont nombreux : voir § 3.2 et 4.3.

Ici les deux seules différences s'observent en fait lorsque la vitesse dépasse 1 m.s⁻¹. D'une part la chute d'épaisseur consécutive à la hausse de la vitesse est de moindre importance pour

l'émulsion la plus chargée en huile. D'autre part, lorsque l'épaisseur recroît, on constate que le film né de l'émulsion à 20 % est plus épais que celui né de l'émulsion dont le taux d'huile initial n'est que de 2 %. On aurait pu penser que cette différence d'épaisseur était la conséquence de la formation d'un film plate-out plus épais. Cependant, à l'aune de l'analyse suivante, cette assertion paraît peu convaincante ou tout du moins insuffisante pour clore le débat :

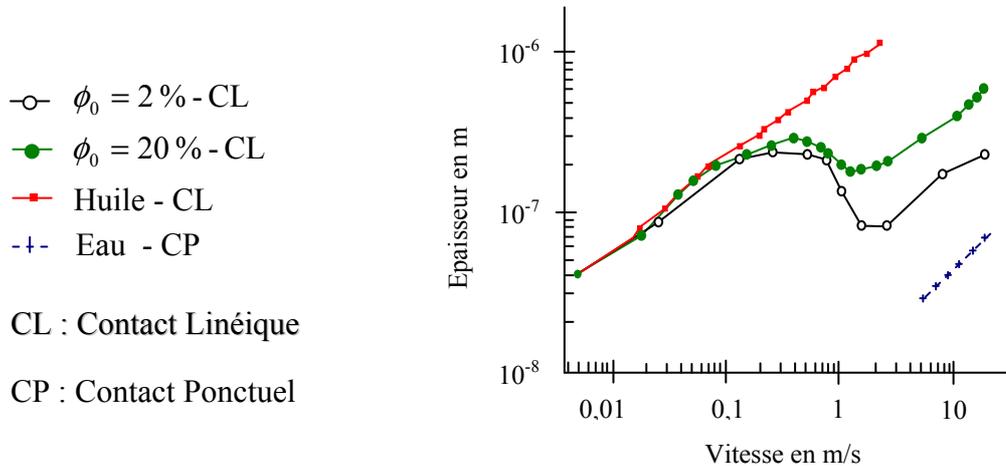


Figure n° 1.18 : Evolution de l'épaisseur en fonction de la vitesse pour des émulsions aux différents taux d'huile. [25]

En log-log, les courbes de l'eau et de l'émulsion (à 20 %) peuvent être assimilées à des droites parallèles. Dans ce cas :

$$(1.33) \quad \log\left(\frac{h_{ém.}}{h_{eau}}\right) = K_0 \Rightarrow h_{ém.} = K_1 h_{eau} \quad Or : h_{eau} = K_2 U^{2/3}$$

$$(1.34) \quad \text{Donc : } h_{ém.} - h_{eau} = K_2 (K_1 - 1) U^{2/3} \quad \text{Avec } K_i \text{ des constantes}$$

Si l'on considère que $h_{pl} = h_{ém.} - h_{eau}$ cela veut dire que la formation du plate-out est d'autant plus efficace que la vitesse de défilement de la bande est grande. Ce résultat est, pour le moins, difficile à admettre ! Pour expliquer ce phénomène, il va falloir trouver un mécanisme dont l'efficacité croît avec la vitesse. Cette remarque ne contredit pas pour autant l'hypothèse selon laquelle le plate-out contribue (dans quelle mesure ?) à l'établissement de ce décalage.

Il faut enfin noter que la taille de l'entrefer est de l'ordre du dixième de micromètre. Par conséquent, la quantité d'huile utile est très faible : 1 L pour laminer 10 km d'une tôle large d'un mètre. Soit 1 L d'huile réellement utile pour un hectare de tôle !

2.3. Commentaire personnel

Si le taux d'huile a une réelle influence sur la valeur critique nommée U_c (expérience de Reich [26]) il n'est pas toujours d'un effet spectaculaire sur la valeur de la vitesse critique U_{c1} (expérience de Zhu [25]). Certes les résultats ne sont pas automatiquement comparables car les conditions expérimentales sont différentes (laminage contre EHD). Cependant, et en intégrant bien toutes les précautions liées à cet état de fait, ce résultat est un résultat de plus qui ne peut que nous inciter à penser, encore une fois, que U_c est bel et bien différente de U_{c1} .

3. Influence de la taille des gouttes d'huile

3.1. Ségrégation spatiale

Dans l'emprise (fig. n°0.10) existent deux écoulements de sens contraire : un écoulement entrant, près des surfaces (là où le terme de Couette est prépondérant) et un écoulement sortant, situé en cœur (là où domine le terme de Poiseuille).

La question qui se pose alors est de savoir si les gouttes d'huile prises partiellement dans ce courant retour sont, ou non, expulsées du contact.

Nakahara en 1988 [27] a précisément étudié le comportement des gouttes d'huile d'une émulsion d'huile dans l'eau, en fonction de leur taille et de leur position dans l'emprise. Il put mettre en évidence l'existence d'un phénomène de ségrégation spatiale, et constater que le comportement des gouttes, face au gradient de pression était dans une large mesure conditionné par leur taille. Kumar [28], en 1996 tente de modéliser ce qui se passe dans l'emprise afin de retrouver par le calcul ces résultats expérimentaux.

Les résultats permettent de distinguer trois types de gouttes : les pénétrantes, les stationnaires et les régressives, en fonction de leur localisation spatiale. Les pénétrantes se trouvent à la périphérie du groupe, près des surfaces antagonistes, alors que celles rejetées se trouvent au cœur de l'emprise. Les gouttes stationnaires sont quant-à elles situées entre le cœur et la périphérie. En équilibre instable, prises entre ces deux courants de sens contraires, elles subissent un mouvement de rotation avant de devenir régressives ou pénétrantes.

Les résultats montrent que la localisation spatiale et donc la nature de la goutte (pénétrante ou régressive) est liée à la taille de la particule. Les particules les plus grosses se trouvent près des surfaces en mouvement alors qu'au cœur se trouvent les gouttes les plus petites [28]. Par conséquent, les gouttes les plus petites ont tendance à être éjectées du contact, alors que les gouttes les plus grosses seront entraînées dans l'emprise. Les gouttes de taille moyenne, se trouvent pour leur part dans une situation d'équilibre entre ces deux courants de sens contraires.

D'après ces résultats, les capacités lubrifiantes d'une émulsion seront donc d'autant plus élevées que le diamètre des gouttes d'huile sera grand.

La véracité de cette assertion est d'ailleurs confirmée par une observation bien connue des lamineurs. Les lamineurs savent en effet qu'une émulsion de qualité (utilisée en mode recirculé) se bonifie avec le temps. Ceci est généralement interprété [29] comme suit : les tensioactifs sont progressivement consommés et dégradés, ce qui entraîne une augmentation de la taille des gouttes d'huile.

3.2. En terme d'épaisseur.

Pourtant, les expériences de Kimura et Okada [30] donnent des résultats contraires à ceux énoncés précédemment. En effet, pour eux, (fig. n°1.19) l'épaisseur du film diminue (ou du moins n'augmente pas) avec la croissance du rayon des gouttes. Cette apparente contradiction est due au fait que de nombreux facteurs peuvent influencer la taille des gouttes : agitation, concentration en huile, en tensioactif... Par conséquent, modifier la taille des gouttes revient à modifier la valeur d'autres paramètres importants comme la tension de surface ou encore la

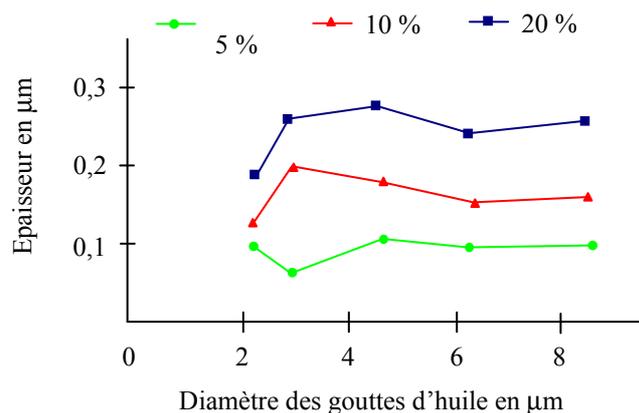


Figure n° 1.19 : Evolution de l'épaisseur du film lubrifiant en fonction de la taille des gouttes d'huile. [18]

stabilité. Or, la modification de ces paramètres n'est pas forcément anodine. Kimura et Okada, pour leur part, font varier la taille des gouttes en faisant évoluer la concentration en tensioactif. Or la concentration en tensioactif influence la valeur de l'énergie de déplacement. Comme cette notion n'est introduite qu'au § 4.2., l'analyse de cette expérience, faite à l'aune de cette nouvelle notion, a été reportée au § 4.3.

4. Influence de la chimie

4.1. pH

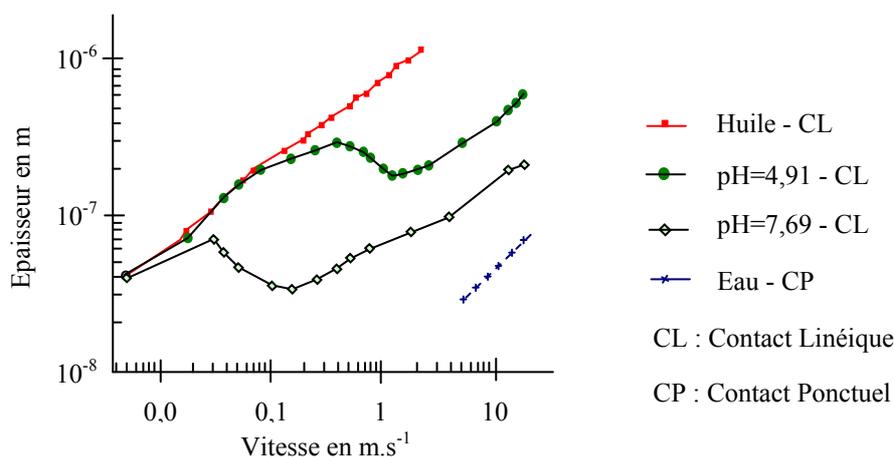


Figure n°1.20 : Evolution de l'épaisseur du film lubrifiant pour deux émulsions aux pH différents. [25]

Zhu [25] a tracé l'évolution de l'épaisseur pour deux émulsions dont la seule différence est la valeur du pH. Abaisser le pH revient à rendre l'émulsion moins stable. Manifestement ces deux émulsions, dont seule la stabilité a été modifiée, ne présentent pas du tout la même courbe d'épaisseur. Pour l'émulsion la moins stable, la valeur de U_{c1} ainsi que l'épaisseur sont bien plus élevées que pour l'émulsion la plus stable. Par conséquent, la stabilité, ou d'une manière plus large, la chimie de l'émulsion semble être bien plus importante que la taille des gouttes ou le taux d'huile ; du moins en terme d'épaisseur.

Des deux émulsions testées, celle qui donne le film le plus épais est celle dont la stabilité est la moins grande (le pH le plus petit). Or ce sont précisément les émulsions les plus instables qui conduisent à la formation des plate-out les plus importants. En conséquence la formation du plate-out, plus ou moins grand en fonction du pH, semble bien pouvoir donner (au moins) un début d'explication au décalage observé.

4.2. Nature de l'émulsifiant

Kimura et Okada [30] se proposent de montrer l'influence de la nature de l'émulsifiant en faisant l'expérience suivante. Les deux émulsions considérées, comprennent la même huile, mais l'une fut élaborée avec l'émulsifiant E_1 , et l'autre l'émulsifiant E_2 . Pour chacune des deux émulsions, il y a même concentration en tensioactif (10 % en poids par rapport à l'huile), même indice de stabilité ESI (table n°1), même taille de gouttes. Cependant en EHD, le coefficient de frottement est 2,5 fois supérieur avec l'émulsion E_1 qu'avec l'émulsion E_2 .

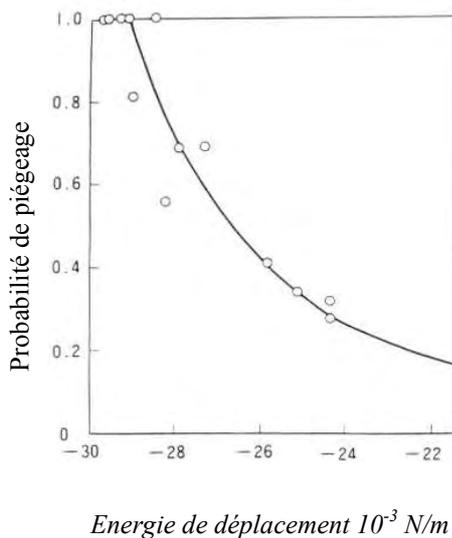
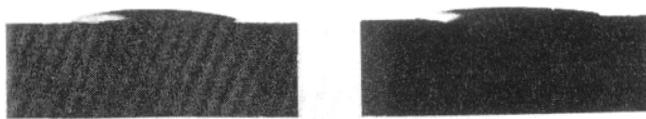


Figure n°1.21 : Evolution de la probabilité de piégeage en fonction de l'énergie de déplacement. [30]

Afin de donner une explication de cet état de fait, Kimura et Okada introduisent la notion de probabilité de piégeage de l'huile par les surfaces antagonistes. Plus les surfaces seront hydrophobes et lipophiles (une surface lipophile n'est pas forcément hydrophobe) plus la quantité d'huile adsorbée sur les surfaces sera importante. Veiller à avoir des cylindres hydrophobes et lipophiles serait donc un moyen d'avoir des cylindres spontanément enduits d'une couche d'huile. Une manière efficace de piéger une quantité d'huile supérieure (donc au niveau des surfaces) et de la forcer à pénétrer dans le contact : de quoi bien évidemment favoriser la lubrification. Cette probabilité de piégeage étant fonction d'une énergie dite de déplacement, voyons ce qu'est cette énergie, comment elle se détermine ; avant bien entendu de revenir à l'interprétation du résultat de l'expérience ci-dessus décrite.

Cette énergie de déplacement est définie comme la différence entre l'énergie de l'interface Eau/Acier et de l'interface Huile/Acier :

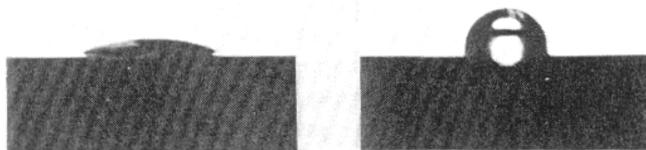
$$(1.32) \quad ED = \gamma_{h/a} \cos(\theta_{h/a}) - \gamma_{e/a} \cos(\theta_{e/a})$$



« E_1 » / Huile

« E_1 » / Eau

Figure n°1.22 - a : l'eau comme l'huile mouille parfaitement la surface d'acier recouverte de l'émulsion élaborée avec le tensioactif E_1 . [30]



« E_2 » /

« E_2 » / Eau

Figure n°1.22 - b : La surface d'acier enduite de l'émulsion constituée du surfactant E_2 est rendue lipophile et profondément hydrophobe. [30]

Dans le cas où la valeur de cette énergie est négative et grande en valeur absolue, alors l'interface huile/acier va se développer au détriment de l'interface eau/acier : voilà pourquoi la probabilité de piégeage de l'huile augmente au fur et à mesure que l'énergie de déplacement diminue.

Pour calculer l'énergie de déplacement dans les deux cas de l'expérience en question, Kimura et Okada ont procédé de la sorte : le cylindre est immergé pendant une minute dans une émulsion (10 % en volume d'huile et 10 % en masse de tensioactif). Puis sur ce cylindre

(après séchage à l'air libre) deux gouttes (1 μL) l'une d'eau pure et l'autre d'huile pure sont déposées. En mesurant les angles de mouillage huile/acier et eau/acier, il est alors possible de calculer l'énergie de déplacement selon la formule (1.32). Les résultats sont reportés en table n°1.

Manifestement, avec le tensioactif E_1 , la tôle est aussi bien mouillée par l'eau que par l'huile, alors qu'avec l'émulsion E_2 , la tôle n'est mouillée que par l'huile (fig. n°1.22).

En conséquence, E_2 par rapport à E_1 aura une énergie de déplacement plus petite, donc une probabilité de piégeage plus grande : ainsi, plus d'huile sera entraînée dans le convergent. Dès lors il n'est plus étonnant de constater que le coefficient de frottement est 2,5 fois supérieur avec l'émulsifiant E_1 qu'avec l'émulsifiant E_2 .

Emulsifiants	Indice de stabilité ESI	Diamètre des gouttes	Probabilité de Piégeage	Angle de contact		Energie de déplacement
				Huile	Eau	
E_1	1	2,73 μm	0	14°	13°	-3,3 N/m
E_2	1	2,85 μm	1	24°	93°	-29,6 N/m

Table n°1

Tout ceci montre bien que ce n'est pas la mouillabilité qui compte mais la différence de mouillabilité.

NB : Si cette hypothèse est retenue, cela signifie que selon les tensio-actifs plus ou moins d'huile pénètre dans l'emprise : cela veut aussi dire que l'épaisseur du film résultant est donc plus ou moins grande selon les tensioactifs utilisés. Or dans l'expérience de Kimura et Okada les gouttes d'huile ont la même taille. Cela montre combien il peut être difficile, lorsque la chimie n'est pas prise en compte, d'établir un lien direct entre épaisseur de film et taille de goutte.

4.3. Concentration de l'émulsifiant

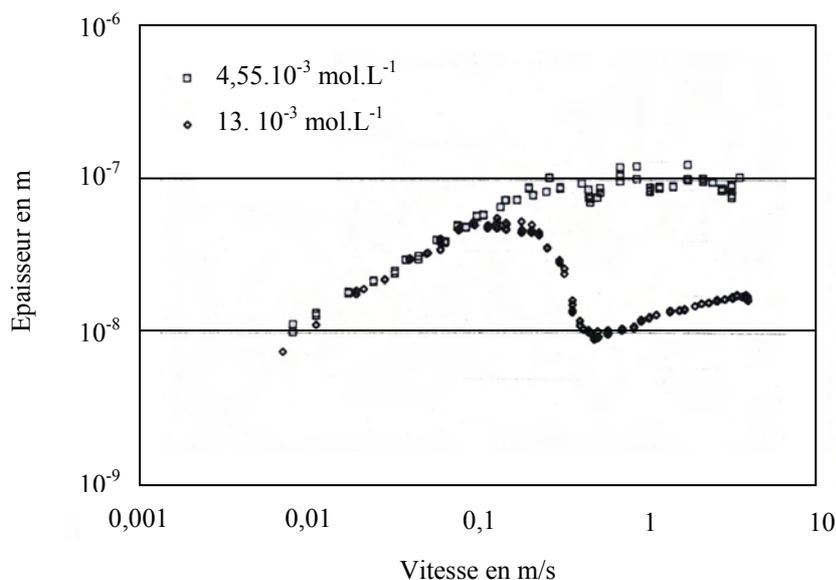


Figure n° 1.23 : Influence de la concentration du tensioactif sur la formation du film lubrifiant pour différentes vitesses lors de l'utilisation d'une émulsion dont le taux d'huile initial est de 4 %. [31]

Spikes [31] a tracé l'évolution des courbes d'épaisseur pour deux émulsions aux taux d'émulsifiant différents. La différence en terme d'épaisseur est saisissante : l'émulsion la plus chargée en émulsifiant conduit à la formation d'un film dix fois inférieur à celui formé par l'autre émulsion. Là encore c'est l'émulsion la moins stable qui donne les meilleurs résultats.

La stabilité de l'émulsion semble ainsi être une valeur sûre lorsqu'il s'agit d'interpréter des résultats expérimentaux. Dans le paragraphe précédent la notion d'énergie de déplacement a été introduite. Voyons alors si dans ce cas précis, l'analyse via l'énergie de déplacement est autant pertinente.

Puisque la différence entre les deux émulsions étudiées, réside au niveau de la concentration en tensioactif, il faut étudier (fig. n°1.24), l'évolution de l'énergie de déplacement en fonction de la quantité d'émulsifiant.

Tant que la concentration de l'émulsifiant est inférieure à la concentration micellaire critique (c.m.c), l'augmentation de la quantité de l'émulsifiant accroît l'énergie de déplacement. Au-delà de la c.m.c. le comportement est inversé puisque l'augmentation du taux de surfactant fait diminuer la valeur de cette énergie.

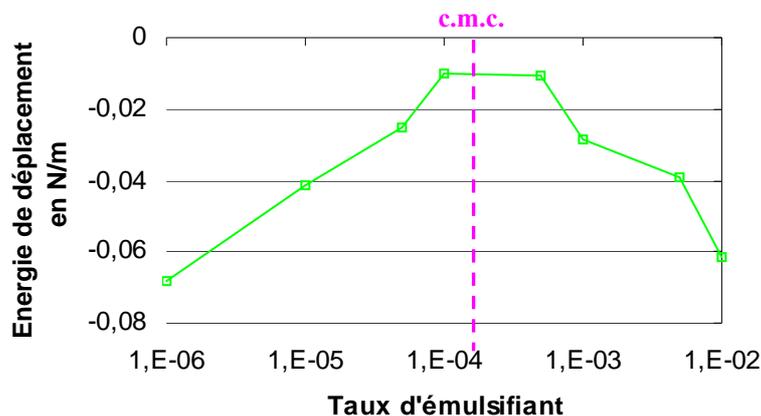


Figure n°1.24 : l'énergie de déplacement augmente avec l'augmentation du taux de tensioactif jusqu'à la c.m.c. Au-delà, l'augmentation du taux de surfactant a pour effet de diminuer l'énergie de déplacement.

Dans le cas des deux émulsions dont les courbes d'épaisseur ont été tracées ci-avant : le taux d'émulsifiant est supérieur à la c.m.c. Par conséquent l'énergie de déplacement est plus grande pour l'émulsion la moins chargée en tension-actif, qui s'avère aussi être la plus performante.

Ce résultat vient tout compliquer. La baisse du frottement avait été interprétée comme étant la conséquence de l'entrée d'une plus grande quantité d'huile dans le contact, due à une plus faible énergie de déplacement. Or le fait de baisser l'énergie de déplacement provoque ici une augmentation de l'épaisseur, ce qui pourrait paraître contradictoire.

En fait tout est pourtant très simple : augmenter la concentration en tensioactif peut provoquer une diminution de la taille des gouttes et augmente quoi qu'il arrive la stabilité de l'émulsion : deux phénomènes, dont chacun est suffisant pour entraîner une diminution de l'épaisseur du film.

Bref, cette expérience loin d'apporter un contre-exemple à l'influence de l'énergie de déplacement montre que l'interaction entre les gouttes d'huile et les surfaces, peut tout simplement être masquée par un autre phénomène. Ici, selon toute vraisemblance, la stabilité et la taille des gouttes.

Avant de conclure, il nous faut revenir à l'interprétation (désormais évidente) des résultats expérimentaux de Kimura et Okada (§ 3.2.). L'augmentation de la taille des gouttes se fait par diminution de la valeur du taux d'émulsifiant. Or lorsque ce taux diminue (tout en restant supérieur à la c.m.c.), la valeur de l'énergie de déplacement augmente, ce qui tend à baisser l'épaisseur du film lubrifiant.

Il y a donc une compétition entre l'influence, de l'accroissement de la taille des gouttes d'une part et la diminution de l'énergie de déplacement d'autre part. Voilà pourquoi, après une phase de croissance, l'épaisseur d'huile passante acquiert une certaine stabilité avec l'augmentation de la taille des gouttes.

5. Conclusion :

A travers les différents résultats expérimentaux présentés, il a pu être établi ce qui suit.

- Pour la lubrification par émulsion en EHD, il existe deux vitesses critiques U_{c1} et U_{c2} . Au delà de U_{c1} , l'épaisseur née de l'émulsion devient plus petite que celle née de l'huile entière. Au delà de U_{c2} , l'épaisseur du film lubrifiant recommence à croître.

- Pour la lubrification par émulsion en laminage à froid, il existe une vitesse critique U_c au-delà de laquelle une augmentation de la vitesse provoque une augmentation du frottement. En terme de frottement, la valeur critique U_c semble être très sensible à la valeur du taux d'huile.

A ce jour aucun lien n'a pu être établi entre U_c (laminage) et U_{c1} ou U_{c2} . Cependant, un faisceau de présomptions nous pousse à penser que la hausse du frottement ne serait pas définitivement due à l'effondrement de la réserve (U_{c1}).

En émulsion comme en huile entière la chimie a un rôle capital à jouer. En négligeant la chimie, il est par exemple tout à fait impossible d'établir un lien entre l'épaisseur du film lubrifiant et la taille des gouttes d'huile.

Les modèles de Szeri et de Wilson, dont la description sera faite ultérieurement (§ III), se proposent de prévoir l'épaisseur du film lubrifiant. Dans le sens où Wilson néglige l'influence de la chimie, il est contraint d'introduire dans son modèle, un paramètre de calage C . Pour Szeri, qui s'attache principalement à décrire l'interaction existante entre les deux fluides, le problème est d'une autre nature.

En terme d'épaisseur, plus l'émulsion est instable, le diamètre des gouttes d'huile grand, l'énergie de déplacement négative et plus le film sera épais.

Mettre ceci en évidence est loin d'être évident, car la modification d'un paramètre peut faire évoluer deux variables aux influences opposées. Cela permet d'expliquer le résultat surprenant de Kimura et Okada (l'augmentation de la taille des gouttes provoque une baisse de l'épaisseur du film lubrifiant) ainsi que celui de Zhu (l'augmentation de la valeur de l'énergie de déplacement provoque une diminution de l'épaisseur du film).

Puisque ces paramètres (stabilité, diamètre des gouttes d'huile, énergie de déplacement) sont fortement couplés, il faut prendre garde à ne pas les faire évoluer dans des directions aux influences contraires.