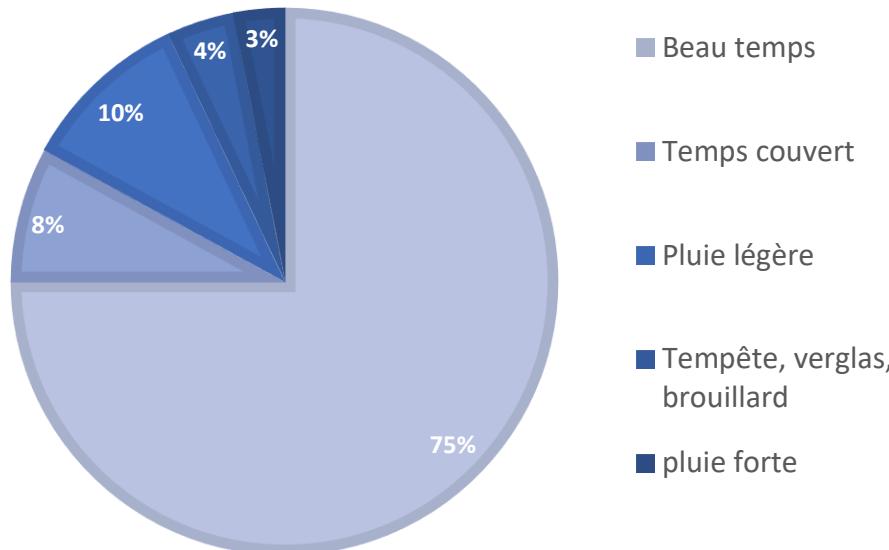


Influence des conditions de la chaussée sur la qualité de freinage



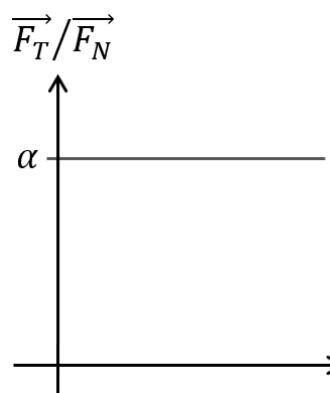
Mise en cohérence

RÉPARTITION DES ACCIDENTS DE LA ROUTE MORTELS SELON LES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES



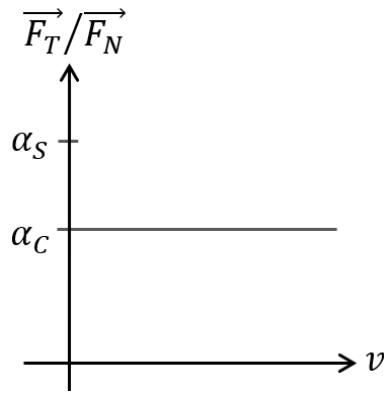
Santé/Prévention : 17% des accidents corporels sont causés sous la pluie.
source - "Bilan 2018 de la Sécurité routière – data.gouv.fr"

Etat de l'art – Modèles de frottement existants



Modèle de Coulomb

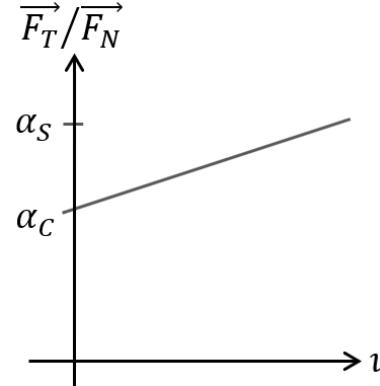
$$\frac{\vec{F}_T}{\vec{F}_N} = \alpha$$



Coulomb + Statique

$$\frac{\vec{F}_T}{\vec{F}_N} = \begin{cases} \alpha_S & \text{si } v = 0 \\ \alpha_C & \text{si } v \neq 0 \end{cases}$$

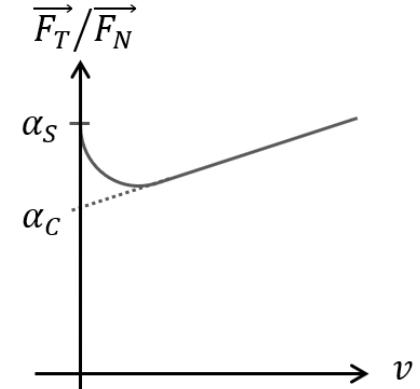
α_C : Coefficient de Coulomb
 α_S : Coefficient Statique



Coulomb + Statique + Visqueux

$$\frac{\vec{F}_T}{\vec{F}_N} = \begin{cases} \alpha_S & \text{si } v = 0 \\ \frac{\sigma}{N} \alpha_C & \text{si } v \neq 0 \end{cases}$$

Modèle de LuGre

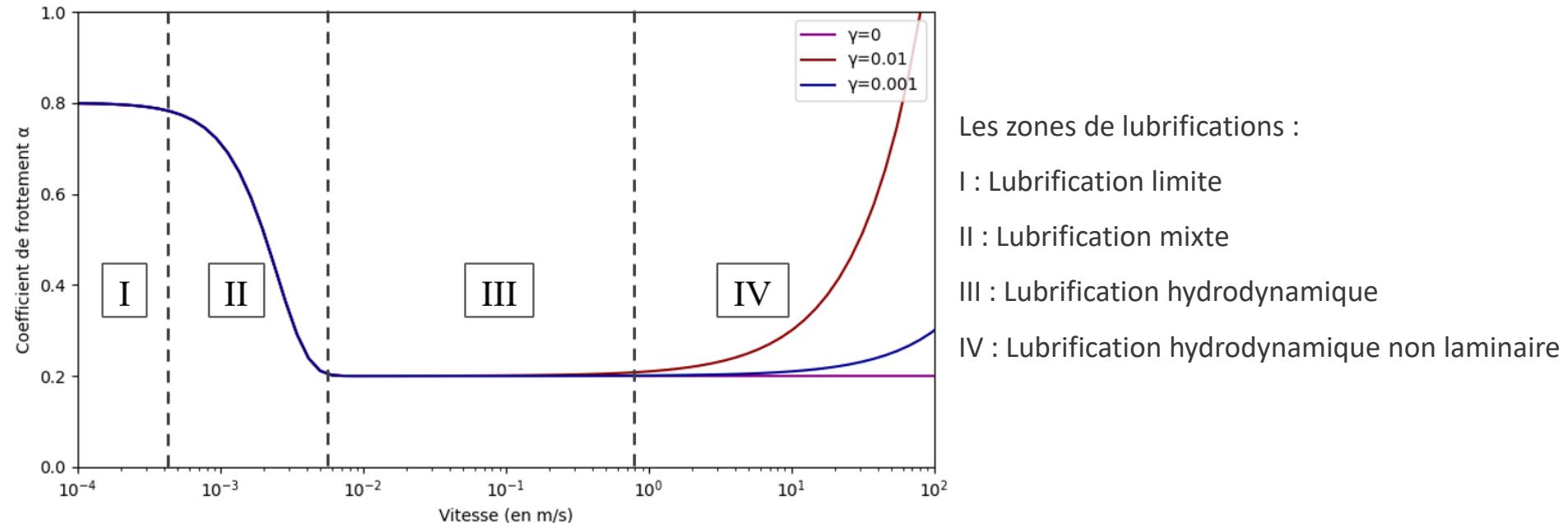


Coulomb + Statique + Visqueux + Effet de Stribeck

σ : Coefficient de viscosité
 N : Charge appliquée au solide

Etat de l'art – Courbe de Stribeck/Modèle de LuGre

Comportement du coefficient de frottement selon la vitesse [1]



Formule du modèle de LuGre (Lund et Grenoble) :

$$\alpha(v) = \alpha_C + (\alpha_S - \alpha_C) e^{-\left(\frac{v}{v_S}\right)^\delta} + \gamma \cdot v$$

$\gamma = \frac{\sigma}{N}$: Coefficient dépendant de la charge et de la viscosité du lubrifiant

v_S : Vitesse de Stribeck (= $0,0025 m/s^*$)

δ : Paramètres de forme de la courbe (= 2*)

* : Valeurs d'exemple obtenues dans : Modélisation et Compensation de Frottements dans un Moteur Linéaire – Sébastien Thierry - 2005

Comment modéliser le comportement des coefficients de frottement selon les conditions de la route afin de minimiser la distance parcourue lors d'un freinage d'urgence ?

Il faut adapter les modèles de frottements car :

- Les modèles de frottements lubrifiés existants ne sont pas adaptés à une rugosité similaire à la route
- Ce sont des modèles complexes demandant beaucoup de paramètres à déterminer donc compliqués à utiliser dans des cas concrets

Objectifs du TIPE:

- Mesurer expérimentalement les coefficients de frottement selon le mouillage de la surface
- Réaliser un modèle simple permettant de décrire le comportement de ces coefficients
- Réaliser un programme informatique permettant d'optimiser la distance de freinage

Partie I – Identification des paramètres

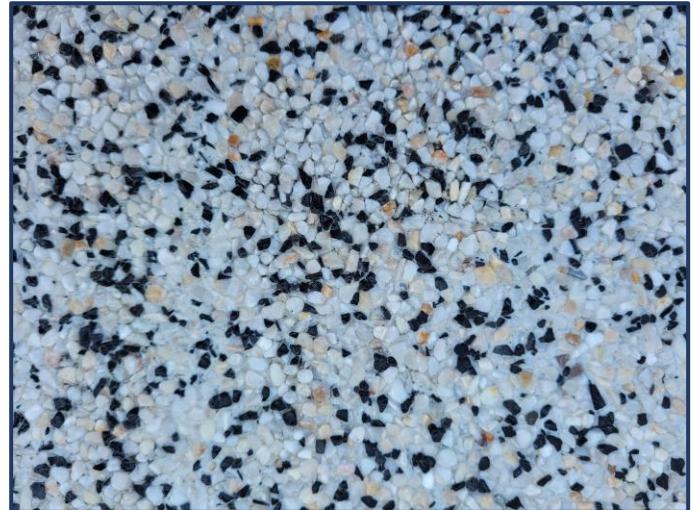
Photo du mobile (Pneu)



Caractéristiques du mobile :

- Masse totale $M = 1303 \pm 1 g$
- Surface de contact : $236 cm^2$
- Profondeur de la sculpture : $6,0 \pm 0,5 mm$

Photo de la surface (Route)



Caractéristique de la surface :

- Surface totale : $S = 3200 cm^2$
- PMP (Profondeur Moyenne de Profil) : $0,1 mm$
- Taille moyenne des graviers : $1,0 \pm 0,5 mm$

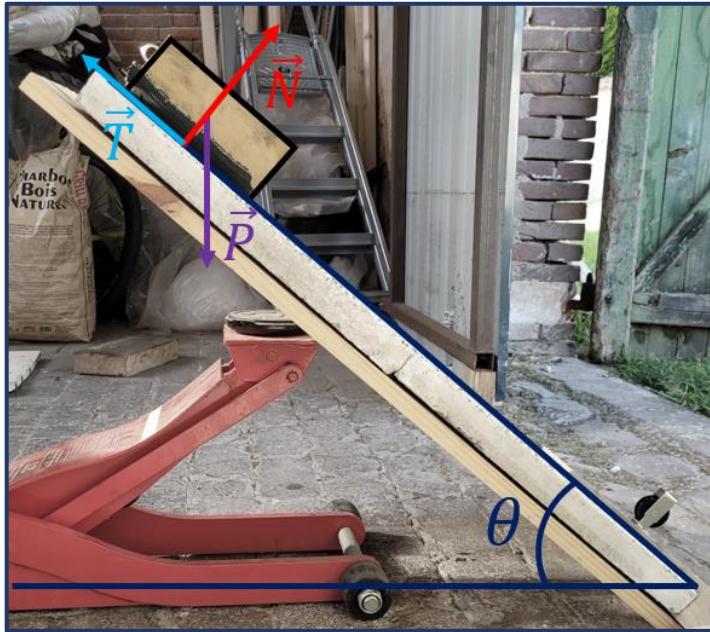
Pour déterminer l'influence de l'eau sur les paramètres :

$$\text{Mesure de l'épaisseur du film d'eau : } e = \frac{\Delta m}{\rho \cdot S}$$

Δm : Masse d'eau déposée sur la surface avec un pulvérisateur

Partie I – Expérience n°1

Montage de la 1^{ère} expérience

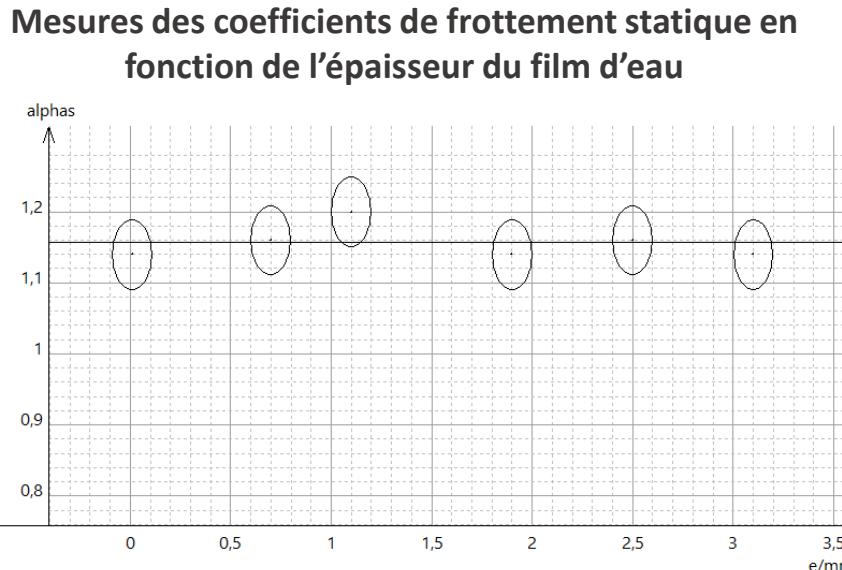


La mesure de l'angle à laquelle le mobile décroche donne le coefficient de frottement statique:

$$\alpha_s = \tan(\theta)$$

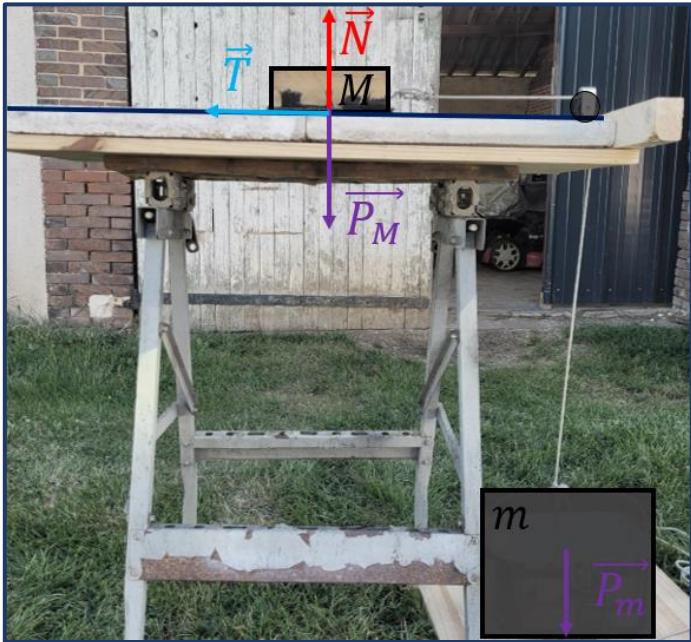
Après modélisation, on remarque que l'épaisseur du film d'eau ne semble pas influencer le coefficient de frottement statique :

$$\alpha_s = 1,157 \pm 0,026$$



Partie I – Expérience n°2

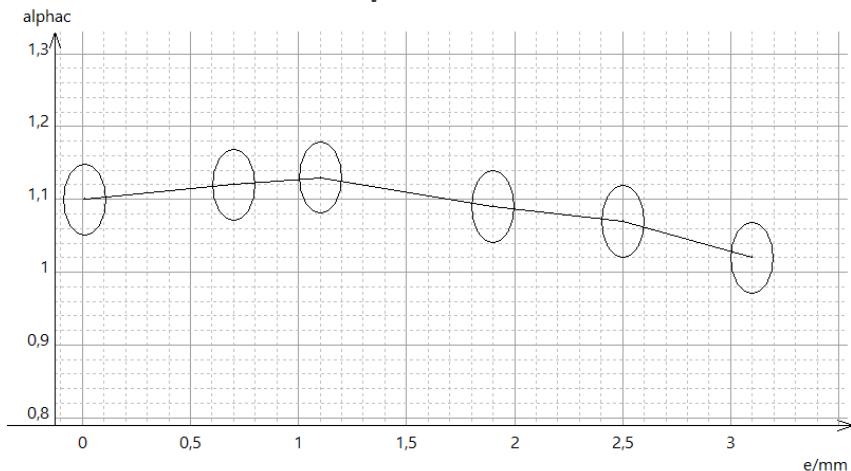
Montage de la 2^{ème} expérience



En reliant le mobile de masse M à une deuxième masse m par un fil inextensible et en la lâchant à une hauteur h , la mesure de la distance parcourue par le mobile lorsque le fil est détendu donne le coefficient de frottement de Coulomb:

$$\alpha_c = \frac{h.m}{(m+M).d + M.h}$$

Mesures des coefficients de frottement dynamique en fonction de l'épaisseur du film d'eau



Le coefficient de frottement dynamique semble être influencé par la quantité d'eau sur la surface cependant le modèle ne correspond pas.

Partie I – Limite des expériences

Un pneu peut évacuer jusqu'à $q_{lim} = 30 L/s$ avant d'être saturé en eau*. Donc la vitesse théorique pour voir les effets de l'aquaplaning :

$$v_{lim} = \frac{q_{lim}}{exl}$$

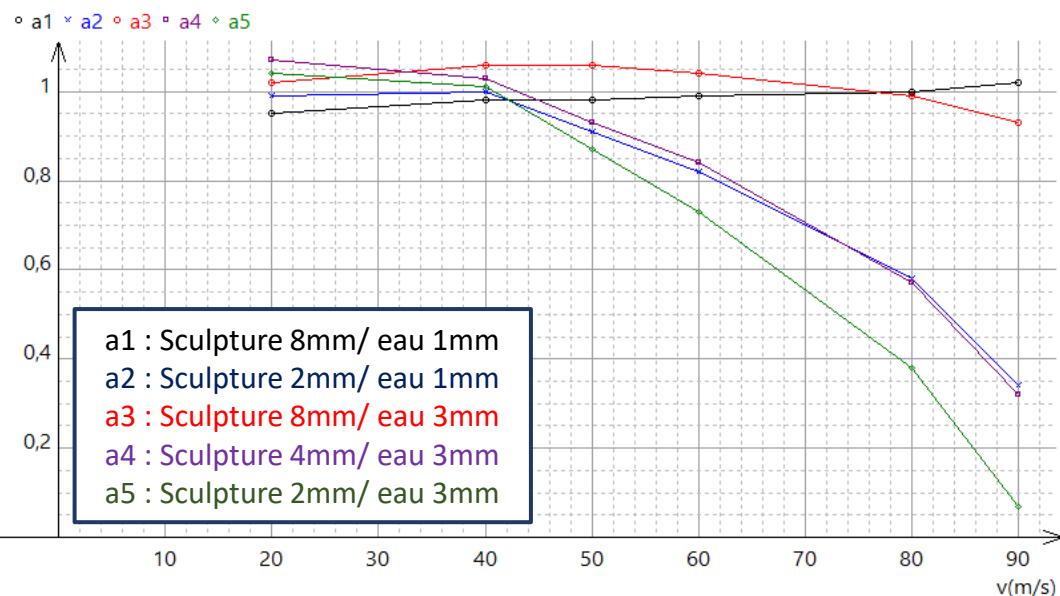
l : Largeur du pneu ($= 18 cm$)

e : profondeur de l'eau ($= 3 mm$)

$$v_{lim} = 55 m/s$$

Ces vitesses ne sont pas atteintes dans les expériences

Mesures des coefficients de frottement en fonction de la vitesse**



Avec les résultats obtenus on peut simplifier le modèle de LuGre :

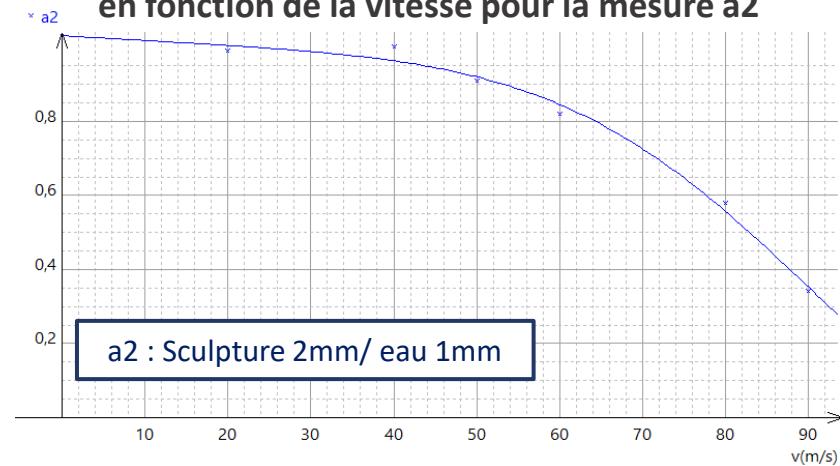
$$\alpha(v) = \alpha_s e^{-(\frac{v}{v_s})^\delta} + \gamma v$$

* : Valeur indiquée par Continental Tire pour un pneu neuf

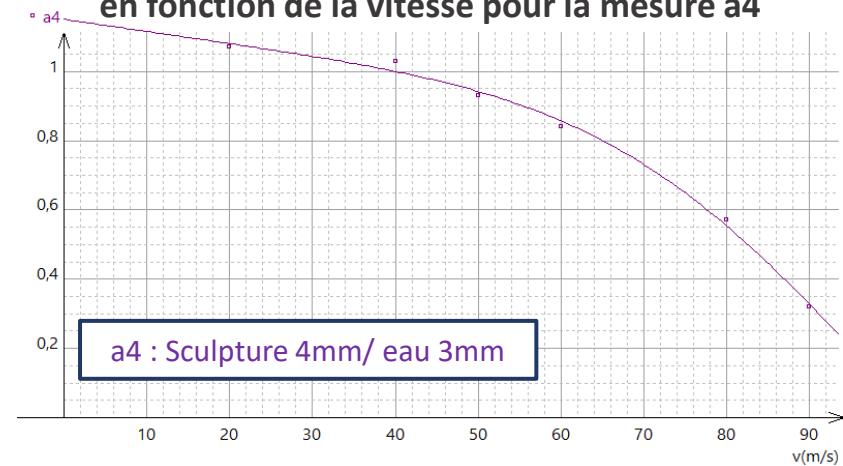
** Mesures obtenues sur : Influence de l'état de mouillage sur les performances d'adhérence des pneumatiques – BLPC – Yves DELANNE, Michel GOTHIÉ - 2005

Partie I – Résultats

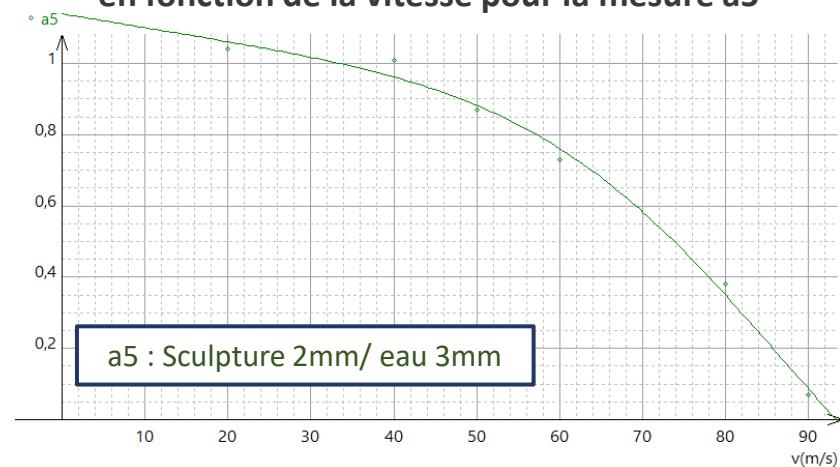
Modélisation du coefficient de frottement dynamique en fonction de la vitesse pour la mesure a2



Modélisation du coefficient de frottement dynamique en fonction de la vitesse pour la mesure a4



Modélisation du coefficient de frottement dynamique en fonction de la vitesse pour la mesure a5



Résultats de la modélisation par Régression

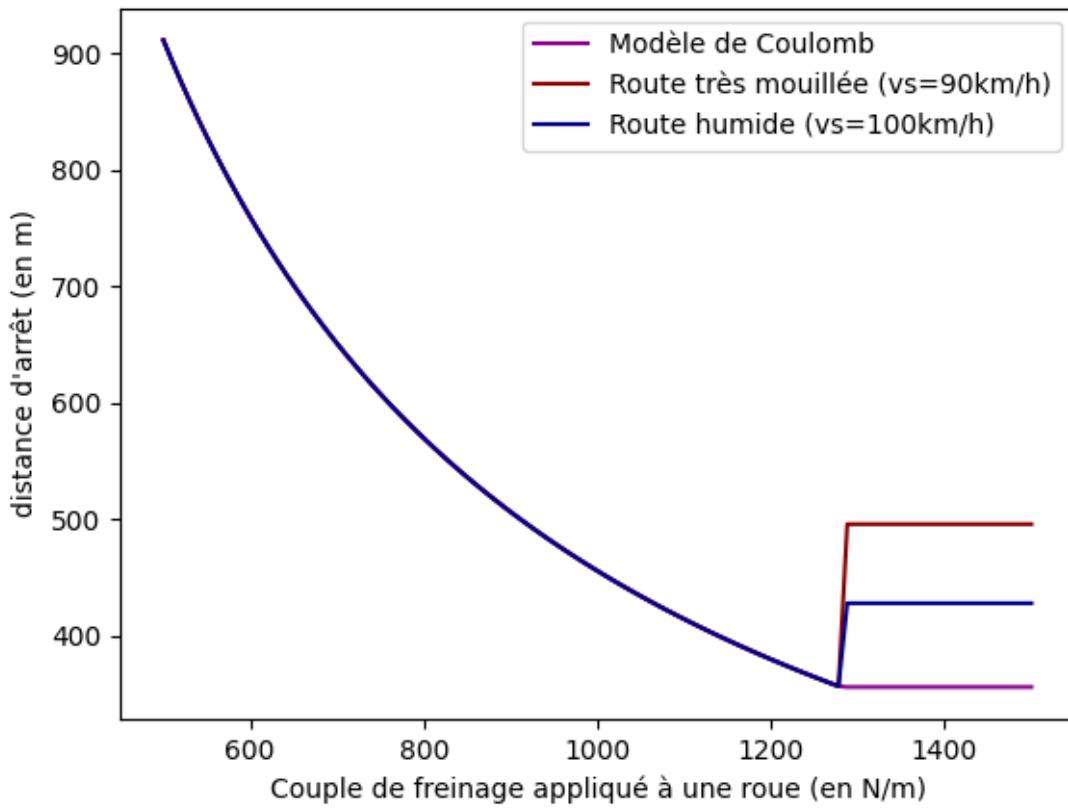
	α_s	$U(\alpha_s)$	v_s (en km/h)	$U(v_s)$	δ	γ (en h/km)	$U(\gamma)$
a2	1.03	± 0.1	95	± 1	5	-1.10^{-6}	$\pm 4.10^{-7}$
a4	1.15	± 0.04	91	± 0.5	5	-3.10^{-6}	$\pm 1.10^{-7}$
a5	1.14	± 0.07	100	± 0.7	5	-4.10^{-6}	$\pm 6.10^{-7}$

v_s est le seul paramètre qui dépend du rapport sculpture/eau
 γ est négligeable

$$\alpha(v) = 1.16 \cdot e^{-(\frac{v}{v_s})^5}$$

Partie II – Application dans le cas d'un freinage d'urgence

Distance d'arrêt en fonction du couple de freinage selon différents modèles [2]



Pour un véhicule de masse $m = 1,5$ tonne et de vitesse initiale $v_0 = 90\text{km}/h$

Couple de freinage où les roues se bloquent :

$$\Gamma_{lim} = \frac{3}{2} \alpha_s \cdot mg \cdot r$$

Cas du freinage sans glissement
 $\forall \Gamma < \Gamma_{lim}$:

$$d = \frac{3}{4} \frac{mv_0^2 r}{\Gamma}$$

Cas du freinage avec glissement

$$\forall \Gamma > \Gamma_{lim},$$

Pour le modèle de Coulomb :

$$d = \frac{v_0^2}{2\alpha_s g}$$

Pour le nouveau modèle, il faut résoudre l'équation différentielle du second ordre non linéaire :

$$\frac{dv}{dt} = -g \cdot \alpha_s \cdot e^{-\left(\frac{v}{v_s}\right)^5}$$

Partie II – Simplification de la Pacejka « MAGIC FORMULA »

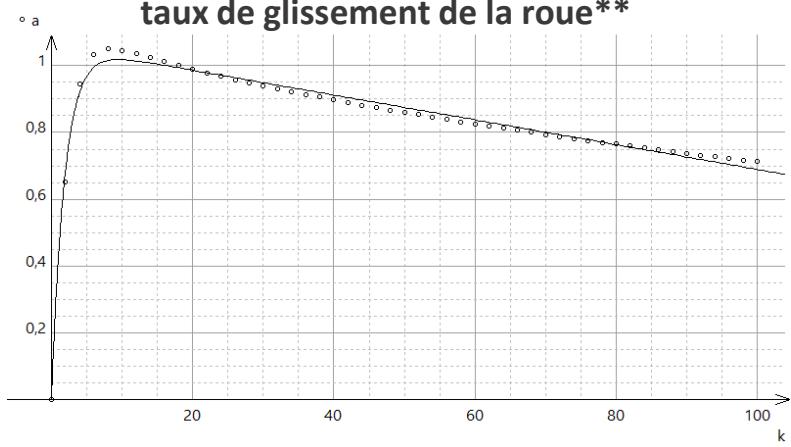
La formule (magique) de Pacejka* est de la forme suivante :

$$\alpha(k) = D \cdot \sin(C \cdot \arctan(B \cdot ((1 - E) \cdot k + (E/B) \cdot \arctan(B \cdot k))))$$

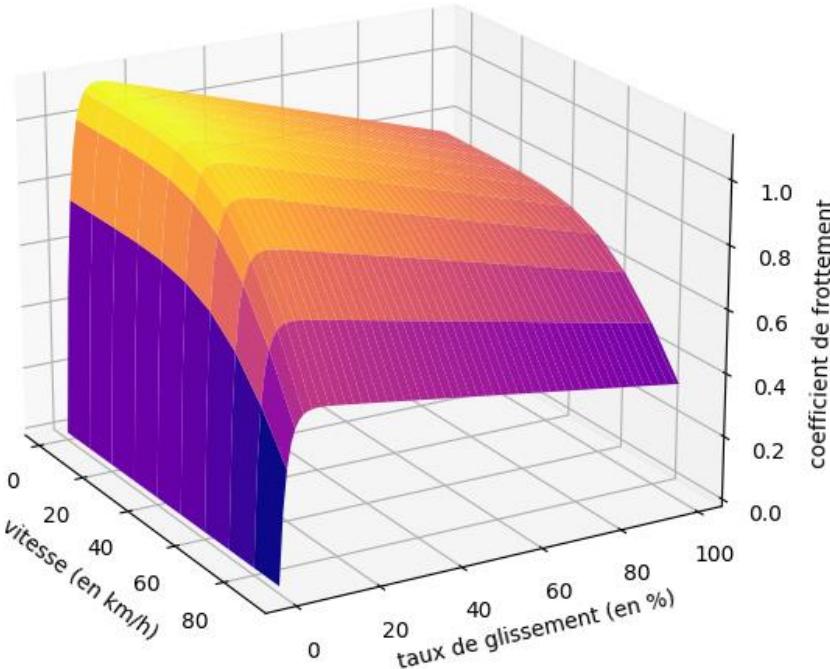
k : Taux de glissement du pneu

B, C, D, E : Des coefficients de forme

Mesures des coefficients de frottement en fonction du taux de glissement de la roue**



Modèle du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement et de la vitesse [3]



On peut simplifier cette formule par la suivante nous permettant de prendre en compte les résultats de la première partie :

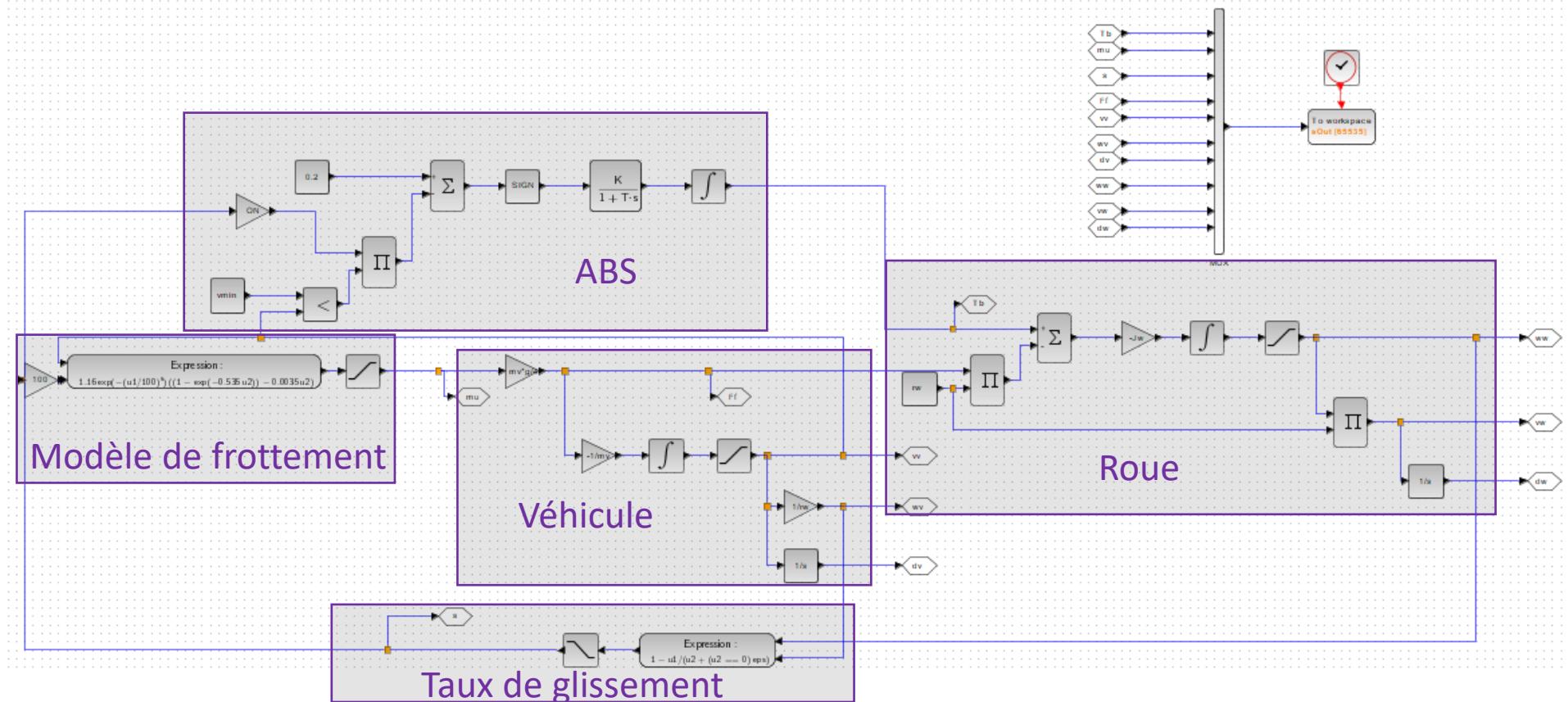
$$\alpha(v, k) = \alpha(v) \cdot ((1 - e^{-0,535 \cdot k}) - 0,0035 \cdot k)$$

* : Tire and Vehicule Dynamics – H. B. Pacejka – 2005

** : Mesures obtenues sur : Adhérence des pneumatiques, adhérence conventionnelle, comparaison et liaison avec la texture – BLPC – Yves DELANNE - 2005

Partie II – Simulation du système d'ABS

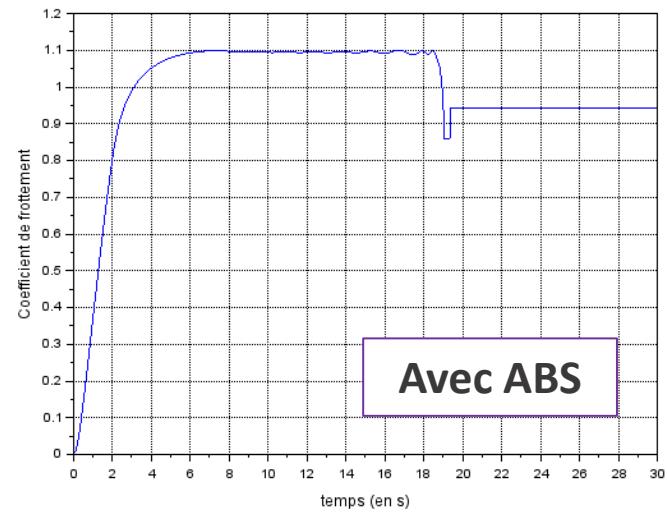
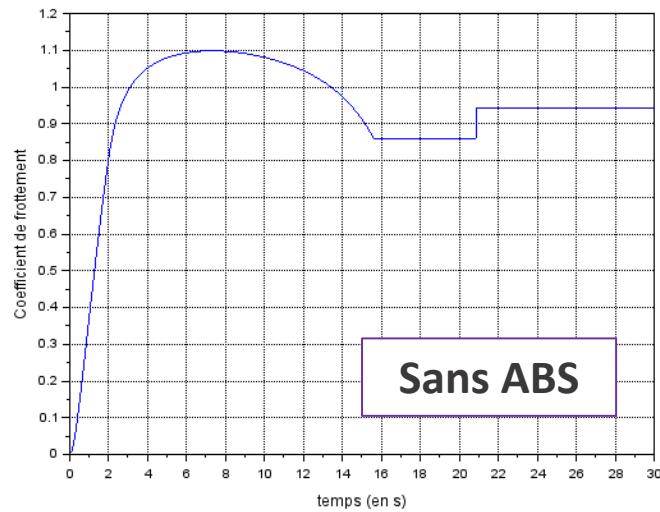
Diagramme XCOS simulant un véhicule équipé d'un système d'ABS (du type bang-bang)*



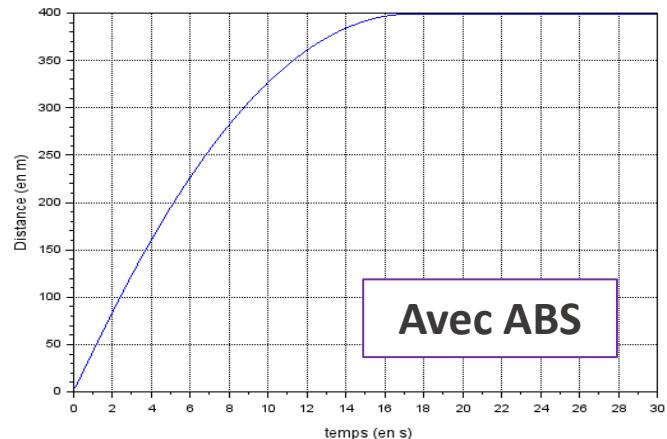
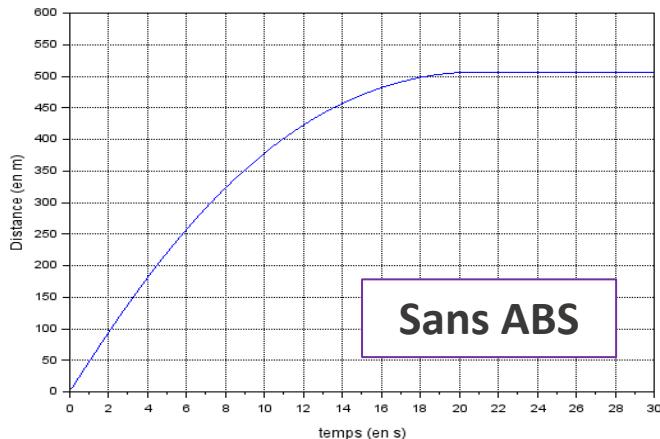
* Diagramme adapté de : Anti-lock braking system (ABS) modeling and simulation (Xcos) – X-engineer.org – Anthony Stark

Partie II – Résultats des freinages par simulation ABS

Coefficient de frottement lors du freinage en fonction du temps



Distance parcourue lors du freinage en fonction du temps



Pour un véhicule de masse $m = 1,5$ tonne et de vitesse initiale $v_0 = 90\text{km/h}$

Conclusion

Déclenchement du système d'ABS lors d'un freinage d'urgence

