

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE

M.Ing.

PAR
Simon BRUYÈRE BERGERON

CARACTÉRISATION DE L'INFLUENCE DES CONDITIONS D'INJECTION ET DES
PROPRIÉTÉS PHYSIQUES SUR LES JETS POUR DES MÉLANGES D'ESSENCE ET
D'ALCOOLS

MONTREAL, LE 30 JUIN 2011

©Tous droits réservés, Simon Bruyère Bergeron, 2011

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Patrice Seers, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. François Morency, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Julien Weiss, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 15 JUIN 2011

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier ma femme, Stéphanie, pour le support constant qu'elle a su me donner durant toutes mes études jusqu'à maintenant. Elle m'a toujours poussé à aller jusqu'au bout, et l'achèvement de ce travail est, en partie, grâce à elle.

Ensuite, je remercie ma famille qui m'a poussé fort pour que je termine ce travail. La dure épreuve à travers laquelle nous sommes passés dernièrement a pesé lourdement sur moi et c'est aussi grâce à eux que je termine ce travail.

Finalement, je n'aurais jamais réalisé un travail de cette ampleur sans l'aide de mon directeur à la maîtrise, Dr Patrice Seers. Ton style d'encadrement m'a forcé à développer du caractère, de la persévérance et de la discipline. Toujours présent pour répondre à mes questions et me guider, je te remercie.

CARACTÉRISATION DE L'INFLUENCE DES CONDITIONS D'INJECTION ET DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES SUR LES JETS POUR DES MÉLANGES D'ESSENCE ET D'ALCOOLS

Simon BRUYÈRE BERGERON

RÉSUMÉ

L'objectif de ce mémoire est d'améliorer la compréhension des différents mécanismes présents lors de l'injection de carburant. Depuis peu, les alcools font leurs entrées dans le marché et sont mélangés, en différentes proportions, à l'essence. Ainsi, il devient important de mieux comprendre comment les propriétés physiques des carburants influencent le jet au niveau de sa pénétration. Le second objectif est d'élaborer un modèle analytique construit à l'aide de corrélations empiriques qui puisse reproduire fidèlement les courbes de pénétrations. La construction de ce modèle permettra d'identifier quels paramètres sont prédominants. Pour ce faire, une série d'essais expérimentaux a été réalisée en utilisant une caméra haute vitesse et une enceinte ayant la capacité d'être pressurisée. Les paramètres à l'étude sont la pression d'injection, la pression ambiante, la température ambiante, la durée d'injection et bien sûr, les propriétés physiques des carburants. Les carburants utilisés sont l'essence, l'iso-octane, l'éthanol et le butanol, ainsi que deux mélanges à parts égales; l'un constitué d'iso-octane et d'éthanol et l'autre, d'iso-octane et de butanol. L'analyse, à l'aide d'un logiciel de traitement d'image, a permis de faire certaines observations. D'abord, il a été noté que les alcools pénètrent moins que l'essence et l'iso-octane et ce, indépendamment des conditions ambiantes. Ensuite, la pression d'injection augmente la vitesse initiale du jet, ce qui a comme conséquence d'atomiser plus finement le jet, ce qui réduit la pénétration. Ensuite, la pression ambiante joue un rôle très important. De par l'augmentation de la masse volumique du milieu ambiant, les forces aérodynamiques vont forcer, de façon systématique, le jet à ralentir et ainsi, réduire considérablement sa pénétration. L'augmentation de la température ambiante fait apparaître des mécanismes complexes liés à l'évaporation. L'enthalpie de vaporisation est un indicateur de la sensibilité d'un carburant à l'augmentation de la température ambiante. Par exemple, l'éthanol, de par sa haute valeur d'enthalpie de vaporisation, est considérablement moins affecté par une augmentation de la température que le butanol. Finalement, la durée d'injection influence le jet uniquement au niveau de la pénétration totale en ajoutant de la quantité de mouvement durant une période plus ou moins longue. En somme, ces tests ont permis de développer des corrélations et de bâtir un modèle empirique. L'avantage de ce modèle est qu'il prend en compte le poids relatif des propriétés physiques des carburants. Ainsi, il a été établi que parmi les trois propriétés physiques prises en compte, la masse volumique s'avère la plus importante durant toute l'injection. Ensuite, durant les moments initiaux de l'injection, l'enthalpie de vaporisation et la température d'ébullition ont sensiblement le même poids relatif, tandis qu'à la fin de l'injection, la température d'ébullition prend le dessus sur l'enthalpie de vaporisation.

Mots clés : Caractérisation de jets, essence, alcools, corrélations empiriques

CHARACTERIZATION OF THE INFLUENCE OF INJECTION CONDITIONS AND FUEL PHYSICAL PROPERTIES ON SPRAYS FOR BLENDS OF GASOLINE AND ALCOHOLS

Simon BRUYÈRE BERGERON

ABSTRACT

The objective of this thesis is to improve the understanding of different mechanisms that are encountered during fuel injection. Recently, alcohols have made their way into the market and are often blended, in different proportions, to gasoline. Therefore, it becomes crucially important to understand how fuels' physical properties influence sprays in terms of penetration. The second objective is to elaborate an analytical model using empirical correlations that can accurately reproduce the spray penetration curves. Furthermore, the construction of these correlations will help identify which variables are predominant. To acquire the necessary data, an experimental setup was elaborated together with high speed imaging techniques. This study's variables are the injection pressure, the ambient pressure, the ambient temperature, the injection duration and the physical properties of the fuels. The fuels used in this research were gasoline, iso-octane, ethanol and butanol as well as two blends in equal volume; one of ethanol and iso-octane and the other, of butanol and iso-octane. The analysis, using an imaging processing program, has yielded certain observations. Firstly, it was noted that alcohols penetrate less than gasoline and iso-octane, independently of ambient conditions. Secondly, injection pressure increases initial spray velocity but ultimately causes the spray to atomise more finely which reduces penetration. Thirdly, ambient pressure has a significant impact on spray penetration because an increase in ambient density causes the aerodynamic forces to increase systematically resulting in a shallower penetration. Fourthly, an increase in ambient temperature triggers complex evaporation mechanisms. The enthalpy of vaporization is an indicator of a fuel's sensitivity to an increase in ambient temperature. For example, ethanol, because of its high value of vaporizing enthalpy, is considerably less affected by an increase of temperature than butanol. Finally, injection duration tests have no impact on penetration curves besides increased penetration due to longer momentum flux input. These tests have helped develop correlations to be implemented in an empirical model. The advantage of this model is that it takes into account the relative weight of fuel physical properties. It was established that, amongst the three properties that were considered, fuel density is the most important throughout the injection. Then, during the early stage of the injection, the boiling temperature and the enthalpy of vaporization have similar relative weight, whereas towards the end of the injection, the boiling temperature becomes more important than the enthalpy of vaporization.

Keywords : spray characterization, gasoline, alcohol, empirical correlations

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	3
1.1 Avant propos	3
1.2 Mécanismes de fragmentation des jets	3
1.3 Paramètres influençant les jets de carburant	4
1.3.1 Milieu ambiant	5
1.3.2 Pression d'injection	7
1.3.3 Propriétés physiques des carburants	8
1.4 Conclusion du chapitre	10
CHAPITRE 2 ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNÉES	12
2.1 Introduction	12
2.2 Montage expérimental	12
2.3 Carburants	14
2.4 Matrice des expériences réalisées	15
2.5 Post traitement des données	17
2.6 Caractérisation des sources d'erreur	18
2.6.1 Répétabilité de l'injecteur	18
2.6.2 Précision des instruments de mesure	20
2.6.3 Précision du système d'acquisition	21
2.7 Sommaire du chapitre	23
CHAPITRE 3 ANALYSE DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES	24
3.1 Introduction	24
3.2 Influence des propriétés physiques des carburants	24
3.3 Influence de la pression d'injection du carburant	27
3.4 Influence de la pression environnante	33
3.5 Influence de la température environnante	39
3.6 Influence de la durée d'injection	51
3.7 Impact sur l'angle de cône	54
3.8 Conclusion du chapitre	56
CHAPITRE 4 DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE EMPIRIQUE	58
4.1 Introduction	58
4.2 Définition des paramètres critiques du ME	58
4.3 Construction des corrélations	60
4.3.1 Régime linéaire	61
4.3.2 Régime décroissant	65
4.3.3 Élaboration d'une corrélation pour les constantes d'amplitude	68
4.4 Transition entre les régimes linéaire et décroissant	71

4.5	Intégration de la température ambiante.....	76
4.6	Conclusion du chapitre	78
CHAPITRE 5 VALIDATION DU MODÈLE EMPIRIQUE		80
5.1	Introduction.....	80
5.2	Méthodes de validation	80
5.2.1	Validation statistique	80
5.2.2	Validation avec de nouvelles données expérimentales	83
5.3	Quantification des sources d'erreur	85
5.4	Récapitulatif du modèle empirique.....	91
5.5	Conclusion du chapitre	94
CONCLUSION.....		95
RECOMMANDATIONS		97
ANNEXE I	SPÉCIFICATION TECHNIQUE DE L'INJECTEUR.....	98
ANNEXE II	SPÉCIFICATION TECHNIQUE DU THERMOCOUPLE	99
ANNEXE III	SPÉCIFICATION TECHNIQUE DU CAPTEUR DE PRESSION.....	100
ANNEXE IV	CODE MATLAB POUR ÉVAPORATION DE GOUTTELETTES	101
ANNEXE V	ÉTUDE DE CONVERGENCE DU CODE MATLAB D'ÉVAPORATION DE GOUTTLETES.....	106
ANNEXE VI	CODE MATLAB POUR CALCUL DES EXPOSANTS DE LA CORRÉLATION	107
ANNEXE VII	CODE MATLAB COURBES DE PÉNÉTRATION	110
ANNEXE VIII	PROCÉDURE D'UTILISATION DU CRITÈRE DE PEIRCE.....	112
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		113

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Propriétés physiques des carburants étudiés15
Tableau 2.2	Matrice des essais expérimentaux.....16
Tableau 2.3	Résumé statistique du test de répétabilité20
Tableau 3.1	Calcul du nombre de Weber pour deux cas d'injection d'iso-octane32
Tableau 3.2	Éléments de calcul pour déterminer la traînée37
Tableau 3.3	Éléments de calcul du nombre de Weber pour deux cas d'injection de butanol38
Tableau 4.1	Exemple de calcul du terme S/t^y61
Tableau 4.2	Exemple du calcul, basé sur le butanol, de la constante d'amplitude des carburants63
Tableau 4.3	Résumé des valeurs de K_{carb} pour le régime linéaire64
Tableau 4.4	Résumé des valeurs de K_{carb} pour le régime décroissant67
Tableau 4.5	Valeurs de la corrélation et valeur expérimentales de K_{carb}71
Tableau 5.1	Répercussion des erreurs liées aux instruments de mesure sur le modèle analytique88
Tableau 5.2	Propriétés physiques de différents alcanes et alcools93

LISTE DES GRAPHIQUES

	Page
Graphique 2.1	Courbes de pénétration du test de répétabilité19
Graphique 3.1	Pénétration du jet en fonction du temps pour quatre carburants : a) $P_{inj} = 8\text{MPa}$ et $P_{amb} = 5\text{atm}$; b) $P_{inj} = 5\text{MPa}$ et $P_{amb} = 5\text{atm}$; c) $P_{inj} = 8\text{MPa}$ et $P_{amb} = 1\text{atm}$25
Graphique 3.2	Pénétration du jet en fonction de la pression d'injection : a) Iso-octane b) Butanol28
Graphique 3.3	Vitesse initiale d'un jet d'iso-octane en fonction de la pression d'injection.....29
Graphique 3.4	Pénétration du jet en fonction de la pression ambiante : a) Iso-octane b) Butanol c) Éthanol34
Graphique 3.5	Vitesse maximale du jet en fonction de la pression ambiante35
Graphique 3.6	Traînée en fonction de la pression du milieu ambiant37
Graphique 3.7	Pénétration du jet en fonction de la température ambiante : a) Butanol b) Éthanol39
Graphique 3.8	Comparaison théorique et expérimentale de la température interne de gouttelettes individuelles de carburant : a) Butanol b) Éthanol.....47
Graphique 3.9	Température interne d'une gouttelette de butanol pour différents diamètres.....48
Graphique 3.10	Taux d'évaporation massique à différentes températures adimensionnalisés par celui à 300K : a) Butanol b) Éthanol49
Graphique 3.11	Pénétration du jet en fonction de la durée d'injection : cas de pression ambiante faible52
Graphique 3.12	Pénétration du jet en fonction de la durée d'injection : cas de pression ambiante de 10atm et pression d'injection de 7MPa.....53
Graphique 3.13	Angle de cône pour quatre carburants en fonction de la pression d'injection (a) et de la pression ambiante (b)55

Graphique 4.1	Sensibilité du terme $\Delta P/\rho_{amb}$ pour différentes combinaisons de ΔP	59
Graphique 4.2	Courbes de tendance pour déterminer l'exposant du terme $\Delta P/\rho_{amb}$ du régime linéaire pour le butanol.....	62
Graphique 4.3	Courbe de tendance pour déterminer l'exposant du terme $\Delta P/\rho_{amb}$ du régime décroissant pour le butanol.....	66
Graphique 4.4	Exemple des courbes de pénétration pour les régimes linéaire et décroissant du butanol à $P_{inj}=8\text{MPa}$ et $P_{amb}=5\text{atm}$	72
Graphique 4.5	Variation du paramètre t_i en fonction des conditions environnantes pour différents carburants.....	74
Graphique 4.6	Comportement des courbes de pénétration à haute température	77
Graphique 5.1	Pénétration expérimentale en fonction de la pénétration prédite par le ME	81
Graphique 5.2	Distribution du ratio des pénétrations prédites et expérimentales	82
Graphique 5.3	Comparaison des courbes empiriques et expérimentales pour différentes pressions ambiantes : cas du B50-iso	84
Graphique 5.4	Comparaison des courbes empiriques et expérimentales pour différentes pressions d'injection : cas de l'essence	85
Graphique 5.5	Comparaison d'une courbe empirique et expérimentale avec barres d'erreur.....	90

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 2.1	Schéma du montage expérimental13
Figure 2.2	Démonstration de l'ambiguïté liée à la définition du front du jet22
Figure 3.1	Schématisation de la fragmentation associée à différents nombre de Weber.....32

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

B50-iso	Mélange à part égale de butanol et d'iso-octane
CFD	Computational fluid dynamics
DI	Direct injection
E50-iso	Mélange à part égale d'éthanol et d'iso-octane
KH	Kelvin Helmholtz
LAS	Lase absortion scattering
LIF	Lase induced fluorescence
Ips	Image par seconde
Mas.	Massique
ME	Modèle empirique
PDPA	Phase doppler particle anemometry
PFI	Port fuel injection
PIV	Particule image velocimetry
PLIF	Planar laser induced fluorescence
psi	Pounds per square inch
RD	Reitz Diwakar
RT	Rayleigh Taylor
SMD	Sauter mean diameter
TAB	Taylor analogy breakup
T50	Température lorsque 50% mas. est évaporé
Vol.	Volumique

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Unités de base

s	Seconde (unité de temps)
m	Mètre (unité de longueur)
K	Kelvin (unité de température)
kg	Kilogramme (unité de masse)
mol	Mole (unité de quantité de matière)

Autres unités utilisées

N	Newton ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$)
Pa	Pascale (N/m^2)
KPa	$1\text{e}3$ Pa
MPa	$1\text{e}6$ Pa
atm	Atmosphère (101 325 Pa)
J	Joule ($\text{N}\cdot\text{m}$)
KJ	$1\text{e}3$ J
MJ	$1\text{e}6$ J
W	Watt (J/s)
ms	Milliseconde ($1\text{e}-3$ s)
mm	Millimètre ($1\text{e}-3$ m)
μm	Micromètre ($1\text{e}-6$ m)
m^2	Surface

Nombres adimensionnels

Re	Nombre de Reynolds ($\text{Re} = (\rho_{\text{amb}} \cdot U \cdot d_g) / \mu_{\text{amb}}$)
We	Nombre de Weber ($\rho_{\text{amb}} \cdot U^2 \cdot L / \sigma_{\text{carb}}$)
Nu	Nombre de Nusselt ($h_{\text{chal}} \cdot d_g / k$)
Pr	Nombre de Prandtl ($C_p \cdot \mu / k$)
Sh	Nombre de Sherwood ($h_{\text{mas}} \cdot d_g / D_{\text{ab}}$)
Sc	Nombre de Schmidt ($\mu / (\rho \cdot D_{\text{ab}})$)

Symboles

t	Temps (s)
ρ	Masse volumique (kg/m^3)
U	Vitesse (m/s)
L	Longueur caractéristique (m)

σ	Tension de surface (N/m)
ν	Degrés de liberté (sans unités)
P	Pression (KPa, MPa, atm)
R	Constante des gaz (287 J/kg.K)
T	Température (K)
C_{De}	Coefficient de décharge (sans unités)
C_D	Coefficient de traînée
D	Traînée (N)
ΔP	Différentiel de pression (MPa)
ΔT	Différentiel de température (K)
d	Diamètre (m)
h_{fg}	Enthalpie de vaporisation (MJ/kg)
A	Aire (m ²)
N	Nombre de données (sans unités)
μ	Viscosité dynamique (kg/m.s)
C_p	Chaleur spécifique à pression constante (J/(kg.K))
k	Conductivité thermique (W/(m.K))
h_{chal}	Coefficient de transfert de chaleur (W/m ² .K)
h_{mas}	Coefficient de transfert de masse (m/s)
$\dot{m}$	Débit massique (kg/s)
D_{ab}	Coefficient de diffusivité binaire (m ² /s)
m	Masse (kg)
Q	Énergie (W)
K	Constante d'amplitude (linéaire : mm ^{1/2} /s ^{1/2} ; décroissant : mm ^{4/5} /s ^{2/15})
R^2	Coefficient de détermination (sans unités)
E	Écart total du système (sans unités)
e	Écart individuel (sans unités)

Indices

amb	Milieu ambiant
carb	Carburant
g	Gouttelette
rel	Relatif
ebul	Ébullition
inj	Injection
chal	Chaleur
m	Moyen
eq	Équilibre
vap	Vapeur
u	Universelle
cond	Conduction
tc	Thermocouple
ref	Référence

exp	Expérimental
corr	Corrélation
the	Théorique
t	Transition
lin	Linéaire
déc	Décroissant

INTRODUCTION

L'efficacité de combustion ainsi que la performance des moteurs utilisant du carburant liquide dépendent grandement du processus de formation du mélange air-carburant. Présentement, de grands efforts sont effectués afin de tenter de comprendre les mécanismes de la combustion. L'objectif étant de maximiser l'efficacité thermique des moteurs et de minimiser les émissions polluantes. Les réglementations gouvernementales de plus en plus strictes forcent les manufacturiers à toujours faire plus avec moins.

Depuis peu et de plus en plus, l'injection du carburant est effectuée directement dans le cylindre (DI), contrairement à l'injection dans les ports d'admission (PFI). Comme cité par Zhao *et al.* (1999), la technologie DI a plusieurs avantages tels qu'une meilleure économie d'essence, un meilleur contrôle sur le ratio air-carburant, un meilleur contrôle sur les stratégies d'injection et ultimement, une réduction potentielle des émissions polluante. De plus, il existe de belles opportunités pour réduire l'utilisation de carburants fossiles. En effet, il devient plus courant de mélanger à l'essence des carburants renouvelables tels que l'éthanol. Cependant, pour profiter pleinement des avantages liés à la technologie d'injection directe conjointement à l'utilisation de carburants renouvelables, il est essentiel de comprendre les principaux mécanismes derrière la formation du mélange air-carburant. Ainsi, à cet égard, l'amélioration des moteurs à pistons passe, avant tout, par une meilleure compréhension de l'injection du carburant. Par le fait même, le sujet de cette recherche porte, plus spécifiquement, sur l'analyse et la caractérisation des courbes de pénétration.

L'objectif principal de ce travail est de comprendre l'importance relative des variables qui influencent le comportement d'un jet de carburant. Pour ce faire, ce travail visera à établir de quelles façons les conditions d'injection ainsi que les propriétés physiques des carburants influencent les facteurs tels que la pénétration totale. Ensuite, une meilleure compréhension des mécanismes prédominants permettra d'élaborer une série de corrélations basée sur les résultats expérimentaux. Ces corrélations prendront en compte, de manière explicite, les variables les plus importantes.

Ce mémoire se divise en cinq chapitres. Tout d'abord, le premier chapitre fait un survol de la littérature pertinente à ce travail et présente ensuite l'objectif principal ainsi que ses trois sous-objectifs. Par la suite, le deuxième présente la démarche expérimentale utilisée pour effectuer les expérimentations. Ensuite, le troisième chapitre porte sur l'analyse des résultats expérimentaux. Le quatrième chapitre présente et explique l'élaboration d'un modèle empirique basé sur les corrélations de pénétration du jet. Finalement, le cinquième chapitre vient valider le modèle empirique, entre autres, à l'aide des résultats expérimentaux présentés dans le troisième chapitre qui n'auront pas été utilisés pour l'élaboration du modèle.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Avant propos

L'efficacité de combustion ainsi que la performance des moteurs utilisant du carburant liquide dépendent grandement du processus de formation du mélange air-carburant. C'est pour cette raison que, depuis plusieurs décennies, la recherche porte sur la compréhension des mécanismes qui régissent la pénétration du jet. Ce chapitre est divisé en plusieurs sujets. D'abord, les différents mécanismes de fragmentation de jet seront discutés afin de permettre au lecteur une meilleure compréhension du sujet traité dans ce mémoire. Ensuite, l'influence de la pression ambiante, de la pression d'injection et des propriétés physiques des carburants sur les jets sera revue afin de mieux situer les travaux du présent mémoire. Finalement, un sommaire du chapitre sera effectué et les objectifs de ce mémoire, en lien avec la littérature existante, seront définis.

1.2 Mécanismes de fragmentation des jets

Les mécanismes gouvernant la fragmentation d'un jet de carburant en fines gouttelettes sont complexes et difficiles à bien maîtriser. Selon Arcoumanis *et al.* (1997), la fragmentation initiale d'un jet peut être causée par une combinaison de trois principaux mécanismes, soit la turbulence présente dans la phase liquide du jet, les bulles de cavitation qui implosent dans le jet ou l'interaction liquide/gaz à la surface du jet et des gouttelettes. Stiesch (2003) explique que l'accélération du jet dans l'orifice de l'injecteur a comme conséquence de faire chuter la pression. Il est ainsi possible que la pression diminue en deçà de la pression de vapeur du carburant ce qui a comme conséquence de produire des bulles de cavitation. Une fois sorties de l'orifice, ces bulles implosent et contribuent à la fragmentation initiale du jet. De plus, la vitesse relative du jet étant élevée, les forces aérodynamiques présentes agissent sur les

surfaces liquides et provoquent des instabilités qui croissent et contribuent à la fragmentation du jet. Il est courant de caractériser la fragmentation à l'aide du nombre de Weber qui permet de classer les différents types de rupture de jet. Ce nombre quantifie l'importance relative des forces aérodynamiques par rapport à la tension de surface du liquide. Sa formulation est présentée à l'équation 1.1.

$$We = \frac{\rho_{amb} \cdot \bar{U}^2 \cdot L}{\sigma_{carb}} \quad (1.1)$$

À l'équation 1.1, ρ_{amb} est la masse volumique du milieu ambiant, U la vitesse du jet, L représente la longueur caractéristique (diamètre d'une gouttelette par exemple) et σ_{carb} , la tension de surface du liquide. Ainsi, plus le nombre de Weber est élevé, plus le mécanisme de rupture tendra à être sévère. Afin de différencier ces mécanismes, on associe à diverses plages de We , un mécanisme différent de fragmentation. De plus, il existe plusieurs modèles numériques utilisés en CFD (Computational Fluid Dynamics) qui reposent sur We pour déterminer le mécanisme responsable de la fragmentation. Pour en nommer que quelques-unes, il y a le modèle RD (Reitz Diwakar) proposé par Reitz et Diwakar (1986), le modèle TAB (Taylor analogy breakup) proposé par O'Rourke et Amsden (1987), le modèle KH (Kelvin Helmholtz) proposé par Reitz (1987), le modèle RT (Rayleigh Taylor) proposé par Taylor (1963), etc. Tous ces modèles utilisent des critères afin de déterminer, par exemple, le diamètre maximal d'une gouttelette pour qu'elle demeure stable selon certains types d'instabilités. Cependant, cette facette des jets ne sera pas discutée dans ce travail, mais elle était fournie à titre d'information générale.

1.3 Paramètres influençant les jets de carburant

Dans cette section, les principaux paramètres influençant les jets de carburants sont présentés et ils sont divisés en trois catégories. D'abord, il sera question de l'influence du milieu ambiant, principalement la pression et la température. Par la suite, la pression d'injection et son influence sur les jets seront traitées. Finalement, l'importance des propriétés physiques sera discutée.

1.3.1 Milieu ambiant

Lorsqu'il est question de chambre à injection à volume constant, le milieu ambiant est caractérisé par deux paramètres : la pression et la température. De plus, la masse volumique est directement liée à ces deux variables. Ainsi, le lien entre ces trois paramètres est la loi des gaz parfaits qui est couramment présentée dans différents livres et ouvrages tels que Çengel et Boles (2002). Sa formulation est présentée à l'équation 1.2.

$$P = \rho_{amb}RT \quad (1.2)$$

À l'équation 1.2, la variable P est la pression ambiante, R la constante des gaz (dans le cas de l'air sa valeur est de $287 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$) et T la température ambiante. La pression ambiante est un paramètre très important en ce qui a trait à la pénétration du jet. En effet, selon Roisman *et al.* (2007), une plus forte pression ambiante a comme conséquence d'augmenter la traînée aérodynamique, ce qui freine davantage le front du jet. Pour une pression d'injection constante, la traînée réduira, de façon globale, la pénétration du jet. De plus, ils présentent les résultats expérimentaux qu'ils ont obtenus à l'aide d'une technique d'imagerie haute vitesse et leurs résultats viennent appuyer ces propos. En effet, ses résultats démontrent clairement un changement significatif des courbes de pénétration qui illustrent que le jet pénètre moins loin lorsque la pression ambiante est plus élevée. De façon plus fondamentale, la pression ambiante affecte aussi le comportement individuel des gouttelettes qui se trouvent à même le jet. En effet, Jasuja et Lefebvre (1994) ont montré qu'une augmentation de la pression ambiante pouvait accroître le SMD d'un jet. Cependant, la taille moyenne des gouttelettes est aussi liée à l'intensité des mécanismes de fragmentation, qui eux sont caractérisés par le nombre de Weber. Il est globalement accepté que plus le nombre de Weber est élevé, plus le SMD est petit (Ragland et Borman (1998), Stiesch (2003)). Il semble donc que la pression ambiante influence la taille des gouttelettes de plusieurs façons. Le résultat final dépend donc du milieu ambiant, mais aussi des propriétés physiques des carburants. De plus, la pression ambiante a aussi une influence sur l'évaporation des gouttelettes dans un jet de carburants.

Kim et Sung (2003) montrent, à l'aide de leurs résultats expérimentaux, qu'à basse température ambiante (300K, similaire aux températures d'essais de ce travail) la durée de vie d'une gouttelette augmente avec un accroissement de la pression. Ceci s'explique par le fait qu'une pression ambiante élevée affecte l'équilibre des phases en présence à la surface d'une gouttelette et ainsi, ralentit son évaporation.

Vanderwege et Hochgreb (1998) ont discuté de l'effet de la température sur la structure du jet. Leurs résultats montrent que la température ambiante a un impact significatif sur la structure interne du jet, tel que la distribution radiale de carburant ainsi que l'apparition de phénomène d'ébullition éclair qui se répercute sur la fragmentation des gouttelettes. Cet impact est plus prononcé avec des carburants volatiles. Ceci suggère donc que la température peut aussi influencer les courbes de pénétration. Les auteurs utilisent l'iso-octane pour illustrer comment la température ambiante influence les propriétés physiques du carburant qui, à leur tour, influencent les caractéristiques du jet. À l'aide de corrélations proposées par Lefebvre (1995), ils démontrent qu'une augmentation de la température ambiante de 60K (303K à 363K) peut entraîner une réduction du SMD de 20%, ce qui a nécessairement un impact sur la dynamique des gouttelettes.

Ainsi, la littérature montre que les conditions ambiantes affectent les jets à plusieurs niveaux. À basse température, une augmentation de la pression ambiante a comme conséquence un nombre de Weber (We) plus élevé (de par une élévation de la masse volumique), ce qui atomise plus finement le jet et réduit la pénétration. À pression constante, une élévation de la température ambiante a comme conséquence une réduction du nombre de Weber (en raison d'une baisse de la masse volumique) ce qui aide la pénétration. Cependant, le transfert de chaleur est plus important ce qui favorise l'évaporation et réduit la pénétration. Ainsi, dans certaines situations, différents mécanismes peuvent agir à contre sens. L'effet global du milieu ambiant dépend donc de quels mécanismes sont prédominant, mais aussi des autres éléments qui gouvernent l'évaporation telle que les propriétés physiques du carburant.

1.3.2 Pression d'injection

La pression d'injection du carburant est aussi un des paramètres les plus importants en ce qui a trait à la caractérisation des jets. Le premier impact significatif se trouve au niveau de la vitesse initiale du jet. Plusieurs auteurs (Stiesch (2003), Roisman *et al.* (2007), Delacourt *et al.* (2005)) utilisent une variation de l'équation de Bernoulli simplifié couplé à un coefficient de décharge pour quantifier la vitesse initiale du jet. La formulation générale de cette équation est présentée ci-dessous, à l'équation 1.3.

$$V_i = C_{De} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{carb}}} \quad (1.3)$$

À l'équation 1.3, le terme C_{De} est le coefficient de décharge, ΔP ($P_{inj}-P_{amb}$), le différentiel de pression à la sortie de l'injecteur et ρ_{carb} , la masse volumique du carburant. L'équation 1.3 démontre qu'une augmentation de la pression d'injection entraîne une augmentation de la vitesse initiale du jet. Les résultats expérimentaux utilisés dans les travaux de Delacourt *et al.* (2005) montrent un net accroissement de la vitesse globale du jet lorsque la pression d'injection est augmentée. Cependant, cette augmentation de vitesse a un effet adverse sur la pénétration. Il a été mentionné, à la section 1.2, qu'un des éléments les plus importants, en ce qui a trait aux mécanismes de fragmentation de jet, est la vitesse relative qui influence le nombre de Weber; plus le We est élevé, plus le jet se fragmente rapidement. De plus, l'équation 1.4 présentée par Sazhin *et al.* (2003), présente la dynamique d'une gouttelette et illustre que, toutes choses demeurant inchangées, une augmentation de la vitesse ($U_{rel,g}$) entraîne un accroissement de la décélération ou qu'une diminution globale du diamètre des gouttelettes (d_g), à vitesse constante, a le même effet. Ces deux éléments ont donc comme conséquence de ralentir davantage le jet.

$$\frac{d^2s}{dt^2} = -\frac{3}{4 \cdot d_g} \cdot C_D \cdot \frac{\rho_{amb}}{\rho_{carb}} \cdot U_{rel,g}^2 \quad (1.4)$$

À l'équation 1.4 le terme de gauche correspond à l'accélération (ou la décélération) d'une gouttelette, le terme d_g représente le diamètre d'une gouttelette, C_D le coefficient de traînée et finalement, le terme $U_{rel,g}$ la vitesse relative d'une gouttelette par rapport au milieu ambiant.

La littérature montre qu'une augmentation de la pression d'injection se traduit directement par une vitesse initiale du jet accrue. Ceci a comme conséquence d'augmenter le nombre de Weber et donc, d'atomiser plus finement le jet ce qui, ultimement, réduit la pénétration. Il est apparent que, comme pour l'effet du milieu ambiant, la pression d'injection fait intervenir plusieurs mécanismes et le résultat global dépend donc de quels mécanismes sont prédominants.

1.3.3 Propriétés physiques des carburants

Les propriétés physiques des carburants vont jouer un rôle de premier plan à plusieurs niveaux. Par exemple, Gao *et al.* (2007) proposent une analyse comparative entre l'essence, l'éthanol ainsi que différents mélanges. En ce qui a trait aux courbes de pénétration, leurs résultats démontrent qu'à pression ambiante faible (atmosphérique), l'ajout d'éthanol à l'essence décroît la pénétration, mais accentue l'angle de cône. Cette tendance est maintenue à une pression ambiante de 5atm, seulement pour l'angle de cône. En effet, à une pression ambiante plus élevée, les résultats semblent indiquer que les courbes de pénétration sont plutôt similaires.

Park *et al.* (2009), quant à eux, ont mené des expériences visant à caractériser les différences au niveau des jets pour l'éthanol, l'essence, ainsi qu'un mélange des deux à une proportion de 85% vol. d'éthanol. Leurs expériences permettent d'illustrer l'impact de certaines propriétés sur la taille des gouttelettes ainsi que sur les mécanismes de fragmentation du jet. Les valeurs élevées de la viscosité cinématique et de la tension de surface de l'éthanol ont comme conséquence de produire des gouttelettes de taille supérieure. Comme il est expliqué dans Borman et Ragland (1998), la viscosité agit contre les forces aérodynamiques en tant qu'élément dissipateur et atténue les instabilités à la surface des gouttelettes. De plus, la

tension de surface d'un carburant joue un rôle restaurateur et permet aussi d'atténuer les instabilités. De façon générale, ces deux propriétés physiques peuvent influencer de façon considérable la taille moyenne des gouttelettes.

Parmi les propriétés physiques qui ont un grand impact, il y a aussi la volatilité d'un carburant qui peut être caractérisée par sa température d'ébullition. Vanderwege et Hochgreb (1998) discutent du phénomène d'ébullition éclair qui a des conséquences importantes sur la structure du jet, l'angle de cône, la taille des gouttelettes ainsi que sur la pénétration. De façon générale, plus un carburant est volatil, plus sa température d'ébullition et sa pression de vapeur sont basses. Ainsi, il est relativement commun d'observer les phénomènes liés à l'ébullition éclair avec des carburants volatils. Bien que leurs résultats ne reposent pas directement sur la pénétration du jet, ceux-ci démontrent une diminution de la taille moyenne des gouttelettes, de l'ordre de 40% lorsque les phénomènes d'ébullition éclair sont observés.

De façon générale, l'influence des propriétés physiques sur les jets d'essence et d'alcools n'a pas été étudiée aussi en profondeur que pour le diesel. Ainsi, quelques ouvrages portant sur l'influence des propriétés physiques sur les jets de diesel et de biodiesel sont présentés afin de faire le lien avec ce travail. Dans la littérature actuelle, ce sont principalement la masse volumique ainsi que la viscosité et la tension de surface qui sont traitées. Par exemple, Chao *et al.* (2008) présente une analyse comparative portant sur les propriétés physiques (principalement la masse volumique et la viscosité) du diesel et du biodiesel. Ils suggèrent que la masse volumique plus élevée du biodiesel contribue à augmenter la quantité de mouvement du jet et ainsi favorise la pénétration. Ceci est confirmé dans les travaux de Lee *et al.* (2002). De plus, il y a consensus dans la littérature sur l'effet de la viscosité et de la tension de surface. En effet, comme expliqué préalablement, une augmentation de ces deux dernières contribue à un SMD plus élevé, ce qui se répercute de façon négative sur l'atomisation et l'évaporation des carburants. (Lee *et al.* (2002), Chao *et al.* (2008), Suh *et al.* (2008)). Le lien entre la viscosité et la taille moyenne des gouttelettes dans un jet est clair, mais il est difficile de comprendre sa répercussion sur la pénétration du jet. Ainsi, dans leurs travaux, Lee *et al.* (2002) n'observent pas d'effet significatif sur la pénétration lorsqu'ils font

le lien avec la viscosité et la tension de surface. Ils abordent aussi la pression de vapeur des carburants qui est directement liée à la température d'ébullition. Bien que la pression de vapeur ait des répercussions directes sur l'évaporation et la distribution radiale de la richesse, leurs travaux semblent indiquer qu'elle n'affecte pas la pénétration de façon significative. Dans leurs travaux, Suh *et al.* (2008) étudient l'influence de la viscosité sur la vitesse moyenne du jet. Ils suggèrent que la viscosité plus élevée du biodiesel augmente la friction durant l'injection et diminue le coefficient de décharge ce qui contribue à réduire la vitesse moyenne du jet. Ceci peut, à son tour, se répercuter sur l'atomisation du jet.

1.4 Conclusion du chapitre

Un survol de la littérature en lien à l'injection de carburant a été réalisé dans ce chapitre. Malheureusement, il n'y a pas beaucoup de littérature qui a trait au sujet de ce mémoire, particulièrement pour les propriétés physiques. Les articles dans la littérature font plutôt le lien avec le diesel. En effet, les jets d'essence ainsi que de mélange essence alcools sont un sujet qui est plutôt récent. Tout de même, il a été vu que les mécanismes gouvernant la dynamique des jets sont nombreux et complexes. Plusieurs facteurs tels que les conditions ambiantes, la pression d'injection et les propriétés physiques peuvent influencer la pénétration du jet. Cependant, il arrive souvent que certains facteurs aillent influencer le jet de façon opposée. Par exemple, une augmentation de la pression d'injection produit une vitesse initiale de jet plus élevée. Par contre, le jet sera atomisé plus finement ce qui réduit davantage la pénétration du jet. Il a aussi été vu que le diamètre moyen des gouttelettes joue un rôle très important au niveau de la pénétration du jet. Le diamètre du jet représenté par le SMD, par exemple, est influencé par la viscosité et la tension de surface du carburant. Plus leurs valeurs respectives sont élevées, plus le SMD sera grand. À son tour, la taille des gouttelettes affecte à la fois la dynamique du jet et son taux d'évaporation qui eux dépendent des propriétés physiques telles que la température d'ébullition ainsi que l'enthalpie de vaporisation.

L'objectif principal de ce travail est de comprendre l'importance relative des variables qui influencent le comportement d'un jet de carburants (essence et alcools, plus spécifiquement). Pour ce faire, certains sous-objectifs sont définis. Le premier sous-objectif est de caractériser les mécanismes prédominants liés à l'environnement d'injection, c'est-à-dire, pression et température ambiante ainsi que pression d'injection. Le deuxième sous-objectif est de déterminer de quelles façons les propriétés physiques des carburants affectent les courbes de pénétration. Finalement, le troisième sous-objectif est de développer un modèle empirique, constitué de plusieurs corrélations, qui pourra reproduire les courbes de pénétration expérimentales. Ceci permettra d'apprécier l'importance relative de chacun des paramètres à l'étude. L'ensemble des corrélations devra prendre en compte, à la fois, l'environnement externe du jet et les dissemblances au niveau des propriétés physiques des carburants.

Le prochain chapitre présente, d'abord, le montage expérimental utilisé afin d'atteindre les objectifs de ce mémoire. Ensuite, une discussion portant sur les sources d'erreurs expérimentales sera effectuée avant de présenter les résultats expérimentaux.

CHAPITRE 2

ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNÉES

2.1 Introduction

La première étape de ce travail est de recueillir suffisamment de données expérimentales pour être en mesure d'effectuer une analyse et d'observer les tendances présentes. De plus, les données permettront de développer des corrélations pouvant reproduire les courbes de pénétration. Pour ce faire, un montage expérimental est réalisé et est présenté. Il sera suivi d'une description des carburants utilisés et de leurs propriétés physiques, d'une matrice des expériences et, finalement, les étapes du post traitement des données seront expliquées. De plus, une sous-section sera allouée à la description des différentes sources d'erreur. Puisque l'incertitude expérimentale est intrinsèquement liée à l'expérimentation, il est important de bien comprendre ses sources.

2.2 Montage expérimental

L'objectif premier du montage est d'avoir la capacité de reproduire toutes les conditions d'opération désirées. Les paramètres clés à l'étude sont la pression d'injection du carburant, les conditions du milieu ambiant telles que la pression et la température. Les autres paramètres, tels que la durée d'injection et les propriétés physiques des carburants, peuvent être contrôlés de façon indépendante. Le montage, qui est présenté à la Figure 2.1, est d'abord constitué d'une enceinte cubique de 260mm de dimension extérieure, fabriquée d'acier et ayant la capacité d'être pressurisée. De plus, l'enceinte peut être configurée pour accueillir jusqu'à quatre ports optiques. Ces ports ont un diamètre de 82,5mm. L'injection du carburant se fait à l'aide d'un injecteur intermittent à trou unique *Siemens* placé sur le dessus de l'enceinte de façon à injecter le carburant verticalement. Les injections sont contrôlées à l'aide d'un microcontrôleur qui permettra d'obtenir des durées d'injection allant de 1,5ms à 4ms à intervalles d'une demi-milliseconde. Pour obtenir les pressions d'injection désirées,

une bonbonne d'azote a été utilisée avec un détendeur de pression *Prostar* (modèle no. PRS409238/CRG580). Le manomètre du détendeur permettait de lire la pression du système. Un réservoir *Whitey* de 125mL en acier inoxydable a été utilisé pour pressuriser le carburant. Finalement, un capteur de pression (Oméga, série PX309) ainsi qu'un thermocouple de type K ont été utilisés pour faire le suivi des conditions d'opération en temps réel. Pour les essais effectués à température élevée, une gaine chauffante (Oméga, série STH051-060) est installée autour de l'enceinte. La température interne de l'enceinte est alors suivie jusqu'à ce que la température désirée soit atteinte.

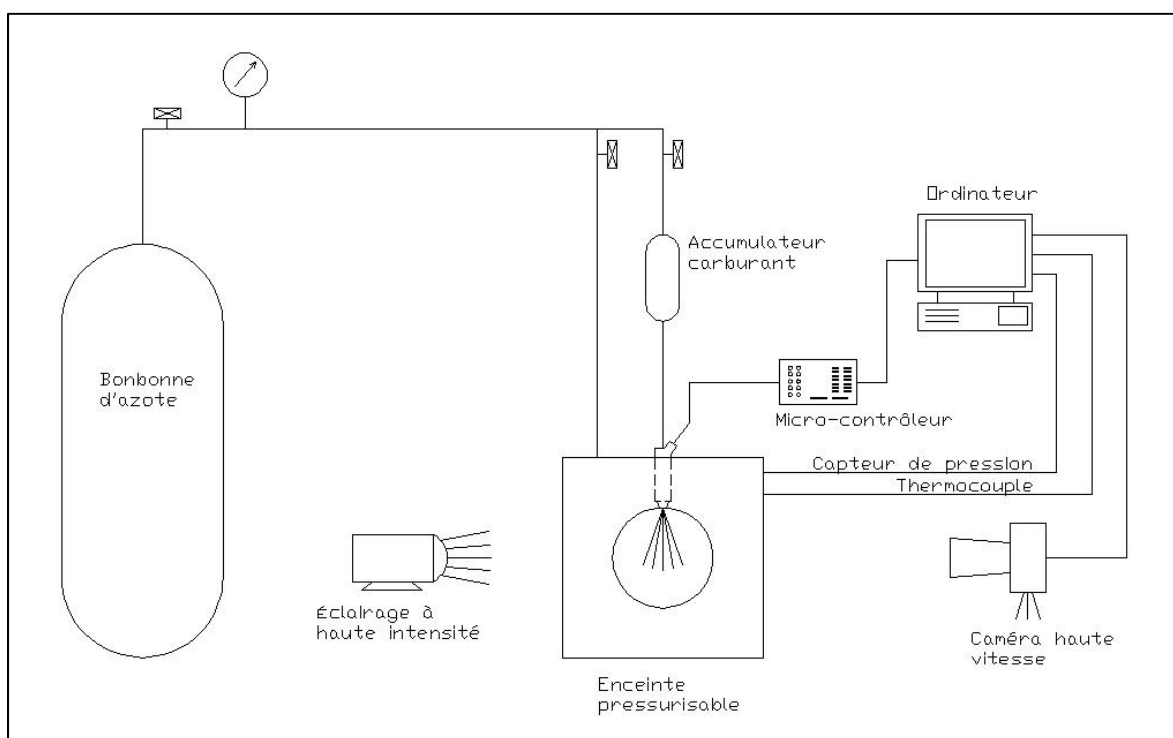


Figure 2.1 Schéma du montage expérimental

En ce qui a trait à l'acquisition de données, une caméra haute vitesse (Photron Fastcam APX) a été utilisée. L'acquisition d'images s'est fait à 4 000 ips (image par seconde) ce qui correspond à une image aux quarts de milliseconde. La vitesse d'acquisition est un compromis entre la résolution de la caméra, l'intensité d'éclairage disponible et la quantité d'images. Afin d'avoir une échelle spatiale uniforme durant les essais, la caméra est toujours positionnée à la même distance de l'enceinte, soit 590mm (distance mesurée de la surface de

l'enceinte au corps de la caméra). De plus, un étalon de référence a été utilisé afin de connaître la dimension physique d'un pixel. Il s'avère ainsi qu'un pixel mesure 0,106mm. Le montage utilisé est similaire à ceux présents dans la littérature (Goa *et al.* (2007), Delacourt *et la.* (2005), Roisman *et al.* (2007)) et son avantage est sa simplicité.

2.3 Carburants

Un aspect important de ce travail est de tenter de mieux comprendre l'influence de l'ajout d'alcool à l'essence sur la pénétration du jet de carburant. Pour ce faire, l'éthanol et le butanol sont utilisés avec de l'iso-octane et de l'essence. L'utilisation de l'iso-octane est justifiée, car il est communément employé comme substitut à l'essence puisque, au contraire de l'essence, il est une substance pure ayant donc des propriétés physiques fixes. Ensuite, des mélanges d'éthanol et d'iso-octane ainsi que de butanol et d'iso-octane sont utilisés pour les tests. Les proportions des mélanges dans les deux cas sont à part égales, c'est-à-dire 50%vol. alcool et 50%vol. iso-octane. Ces carburants ont la notation respective E50-iso et B50-iso. Ainsi, six substances sont utilisées à des fins expérimentales. Le Tableau 2.1 présente les propriétés physiques des carburants qui ont été jugées comme étant les plus importantes dans le contexte de ce travail. À l'exception de l'essence, toutes les propriétés physiques des carburants ont été tirées du manuel des composés chimiques de Yaws (2003). Les propriétés de l'essence proviennent de Heywood (1988) et sa température d'ébullition, qui s'avère être T50 (température lorsque 50% mas. est évaporé), provient de Bruno *et al.* (2009).

Comme le mentionnent plusieurs auteurs tels que Gao *et al.* (2007) et Park *et al.* (2009), il est vraisemblable que les propriétés physiques ont le potentiel d'influencer le comportement du jet de carburant. Les propriétés présentées au Tableau 2.1 ont été choisies parmi l'ensemble des propriétés physiques des carburants puisqu'il a été jugé qu'elles représentaient le plus fidèlement trois mécanismes prédominants. Tout d'abord la quantité de mouvement, directement lié à la masse volumique du carburant. Ensuite, la volatilité qui est fondamentalement représentée par la température d'ébullition du carburant. Finalement, l'énergie nécessaire pour évaporer un liquide est représentée par l'enthalpie de vaporisation.

Tableau 2.1 Propriétés physiques des carburants étudiés

	ρ (kg/m ³)	T_{ebul} (K)	h_{fg} (MJ/kg)
Essence ¹	720-780	398 ²	350.00
Iso-octane	688	369	271.45
Éthanol	781	351	725.69
Butanol	779	390	494.75
B50-iso	734	380	390.02
E50-iso	735	360	512.95

À des échelles plus petites, comme celles des gouttelettes individuelles, certaines propriétés physiques telles que la viscosité et la tension de surface auraient été pertinentes à traiter. En effet, ces deux dernières propriétés sont plutôt utilisées pour caractériser le SMD d'un jet. Cependant, aux échelles macroscopiques des jets de carburant, les trois propriétés physiques présentées au Tableau 2.1 sont adéquates pour caractériser la pénétration du jet. De plus, dans les travaux de Lee *et al.* (2002), aucun effet significatif sur la pénétration du jet n'a été observé lorsqu'ils font le lien avec la viscosité et la tension de surface. Ainsi, la masse volumique des carburants est communément utilisée dans diverses corrélations liées aux jets de carburants (Stiesch (2003) et Roisman *et al.* (2007)). Ensuite, la température d'ébullition et l'enthalpie de vaporisation, qui sont essentielles pour quantifier certains mécanismes tels que ceux liés à l'évaporation des jets, peuvent être retrouvées dans la littérature, par exemple, dans les travaux de Zigan *et al.* (2011).

2.4 Matrice des expériences réalisées

Les variables étudiées sont la pression d'injection, la pression ambiante, la température ambiante, la durée d'injection et finalement, les propriétés physiques des carburants. Comme

¹ Heywood (1988)

² Bruno *et al.* (2009)

stipulé précédemment, les propriétés physiques jugées les plus importantes sont celles qui ont trait aux mécanismes globaux de pénétration du jet, soit la masse volumique, la température d'ébullition et l'enthalpie de vaporisation. Pour étudier l'effet de la pression d'injection, des tests ont été faits à une pression d'injection de 5, 6, 7, 8 et 9MPa. Ensuite, pour étudier l'influence de la pression ambiante, des tests à des pressions environnantes de 1, 2,5, 5, 7,5 et 10 atmosphères (atm) ont été réalisés. Les tests de température ont été réalisés uniquement sur l'iso-octane et à des températures ambiantes de 300, 350 et 400 K.

Tableau 2.2 Matrice des essais expérimentaux

P_{inj} (Mpa)	P_{amb} (atm)	t_{inj} (ms)	T_{amb} (K)	Essence	Iso-octane	Butanol	Éthanol	B50-iso	E50-iso
5	5	2	300	x	x	x	x	x	x
6	5	2	300	x	x	x	x	x	x
7	5	2	300	x	x	x	x	x	x
8	5	2	300	x	x	x	x	x	x
9	5	2	300	x	x	x	x	x	x
8	1	2	300	x	x	x	x	x	x
8	2,5	2	300	x	x	x	x	x	x
8	7,5	2	300	x	x	x	x	x	x
8	10	2	300	x	x	x	x	x	x
8	5	1,5	300	x	x	x	x		
8	5	2,5	300	x	x	x	x		
8	5	3	300	x	x	x	x		
8	5	3,5	300	x	x	x	x		
8	5	4	300	x	x	x	x		
7	10	2	300		x				
7	10	2,5	300		x				
7	10	3	300		x				
7	10	3,5	300		x				
7	10	4	300		x				
6	5	2	350		x	x	x		
6	5	2	400		x	x	x		

Finalement, des essais avec des temps d'injection de 1,5, 2, 2,5, 3, 3,5 et 4 ms ont été effectués pour tenter de comprendre l'effet de la durée d'injection. La matrice des essais expérimentaux est présentée au Tableau 2.2. Les cases accompagnées d'un «x» correspondent aux essais qui ont été réalisés. Ce sont les conditions typiques d'un moteur à essence qui ont servi à définir les plages pour la matrice d'essais.

Pour faciliter l'étude de l'influence des différents paramètres, une condition standard a été déterminée. La condition standard est fixée à une pression d'injection de 8MPa, une pression ambiante de 5atm, une température ambiante de 300K et une durée d'injection de 2ms. Il suffit de faire varier un des paramètres tout en conservant les autres constants pour étudier son influence sur la pénétration du jet. Il est nécessaire de souligner que les effets de pression d'injection et de pression ambiante ont été étudiés de façon plus exhaustive puisqu'ils ont été testés sur tous les carburants. Il sera vu subséquemment que le différentiel de pression ΔP est un des paramètres les plus critiques de la pénétration du jet, justifiant ainsi l'amplitude des essais effectués.

2.5 Post traitement des données

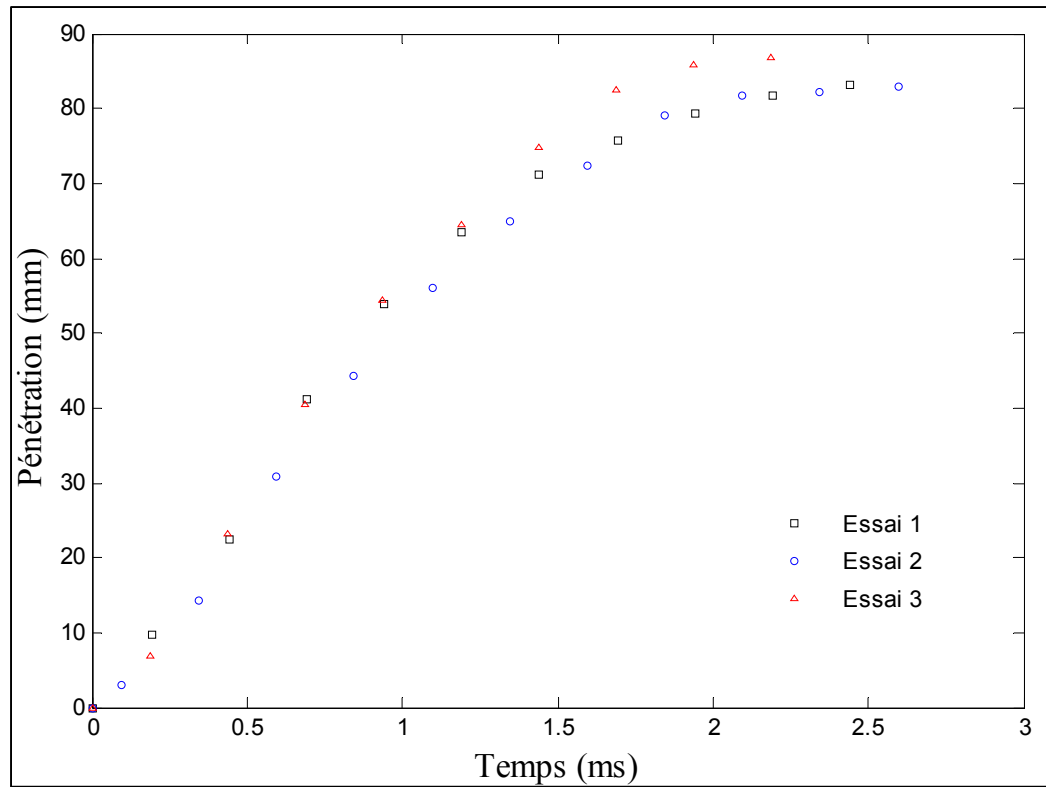
Pour chacun des essais effectués, cent images sont conservées équivalentes aux vingt premières millisecondes de l'injection. Il se trouve que la totalité du phénomène étudié dans ce travail se produit, dans tous les cas, durant les dix premières millisecondes. Chaque image devait être analysée afin d'en déduire la pénétration en fonction du temps. Pour se faire, le logiciel *Spotlight-16*, version du 27 août 2004, a été utilisé. Ce logiciel, accessible à tous sur internet, a été développé par une équipe de la *NASA* et sa particularité est qu'il permet d'enregistrer la position du curseur lors d'un «click» sur des images qui défilent et le tout est sauvegardé sur un fichier texte. Par la suite, il est possible de tracer la position du front du jet à l'aide des coordonnées des pixels et ensuite, connaissant la dimension d'un pixel (0,106mm), la position du front est convertie en millimètre. Par la suite, les logiciels *Excel*, de la série MS Office 2007, ainsi que Matlab sont utilisés afin de classer, organiser et gérer l'ensemble des données.

2.6 Caractérisation des sources d'erreur

Comme dans toute série d'essais expérimentaux, il y a des sources d'erreurs qui peuvent être attribuables, à la fois, au montage et aux instruments de mesure. L'identification des sources d'erreur permet de déterminer leurs importances relatives par rapport aux mesures prises. Par la suite, il devient plus facile d'expliquer les écarts qui surviennent entre les résultats prédits et expérimentaux. L'objectif de cette section est de présenter les principales sources d'erreur et d'établir de quelles façons elles pourraient affecter les données expérimentales. Les sources d'erreur peuvent être divisées en trois catégories : erreurs causées par les variabilités de l'injecteur, erreurs causées par l'imprécision des instruments de mesure et erreurs causées par l'imprécision du système d'acquisition. Au chapitre 5, chaque erreur sera quantifiée, permettant ainsi d'estimer l'incertitude liée aux instruments de mesure.

2.6.1 Répétabilité de l'injecteur

La source d'erreur la plus probable provient directement de la capacité de l'injecteur de produire des données répétables. Comme il est mentionné dans l'article publié par Kostas *et al.* (2009), l'utilisation d'un système d'injection amène son lot de variabilité. Puisqu'il est question d'écoulements turbulents, une série de jet successif ne peut être tout à fait identique. Afin de quantifier cette source d'erreur, une série de tests a été réalisée. Le test consistait à filmer un jet d'essence ($P_{inj}=8\text{MPa}$, $P_{amb}=1\text{atm}$ et $t_{inj}=2\text{ms}$) de façon répétée et d'observer les courbes de pénétration. Au total, trois essais ont été réalisés. Dans plusieurs articles (Rotondi et Bella (2006), Roisman *et al.* (2007), Park *et al.* (2009)), ce test de répétabilité n'est pas présenté, ce qui met en question la pertinence des données. Bien que le nombre de tests effectué dans le cas présent semble peu, le résultat de cet exercice viendra, au minimum, quantifier l'existence d'une variation expérimentale au niveau des essais. Le Graphique 2.1 présente les courbes du test de répétabilité. Le faible nombre de tests de répétabilité est dû à un bris de la caméra haute vitesse à la fin des expériences.



Graphique 2.1 Courbes de pénétration du test de répétabilité

Le Graphique 2.1 permet d'observer qu'il existe, effectivement, une variation au niveau des courbes de pénétration et ce, même si les conditions du test sont identiques. Afin de quantifier l'importance de cette variation, une régression polynomiale est effectuée pour chacune des trois courbes. Par la suite, à l'aide des équations obtenues, les valeurs de pénétration sont calculées à des intervalles de 0,25ms pour les trois cas dans le but d'obtenir une moyenne et un écart type. En divisant chacun des écarts types par leurs moyennes respectives, on obtient les coefficients de variations le long d'une courbe de pénétration moyenne. Le Tableau 2.3 présente le résumé des valeurs obtenues. Puisque ces données ont été obtenues en utilisant le système de post traitement des données, il est à noter que l'erreur observée englobe toutes les erreurs à l'exception des celles attribuables aux instruments de mesure. Le calcul de l'incertitude totale du système sera effectué dans une section subséquente de ce travail.

Tableau 2.3 Résumé statistique du test de répétabilité

Temps (ms)	Moyenne (mm)	Écart Type (mm)	Coefficient de Variation (%)
0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	11,90	0,98	8,23
0,50	26,54	1,85	6,98
0,75	41,29	2,58	6,24
1,00	54,65	3,01	5,51
1,25	65,62	3,18	4,84
1,50	73,71	3,23	4,38
1,75	78,96	3,33	4,21
2,00	81,91	3,45	4,21
2,25	83,61	3,37	4,03
2,50	85,65	3,31	3,86

L'utilisation du coefficient de variation donne une mesure relative de l'erreur par rapport à la pénétration du jet. Dans le Tableau 2.3, il est possible de remarquer que le coefficient de variation est plus élevé dans les moments initiaux du jet. Ceci s'explique par le fait que pour une petite fluctuation du jet, qui est comparée à une petite valeur de pénétration, on obtient un écart relatif plutôt élevé. Pour cette raison, une moyenne des coefficients de variation est effectuée. Ainsi, de façon conservatrice, il peut être affirmé que la variation expérimentale attribuable à l'injecteur est de $\pm 5\%$.

2.6.2 Précision des instruments de mesure

Les instruments de mesure utilisés pour mesurer les points d'opération ont certainement la capacité d'introduire des erreurs. Les instruments en question sont le manomètre pour la pression d'injection, le capteur de pression pour la pression ambiante et le thermocouple pour la température ambiante. Effectivement, une incertitude au niveau de la précision des

mesures obtenues a des répercussions au niveau des courbes expérimentales. À l'aide des fiches techniques de chacun des instruments de mesure, il est possible de quantifier les incertitudes de mesure potentielles. D'abord, pour le manomètre servant à obtenir la pression d'injecteur, l'erreur possible est aussi grande que la demie d'un intervalle de mesure. Dans le cas présent, l'intervalle de mesure est de 100psi, ce qui suggère une erreur possible de $\pm 50\text{psi}$ ou $\pm 0,345\text{ MPa}$. Le capteur de pression servant à mesurer la pression interne de la chambre à injection est précis à $\pm 0,25\%$ (voir ANNEXE III), mais il faut ajouter l'erreur attribuable à l'opérateur qui est estimée à $\pm 2,5\text{psi}$ (le pire cas sera lors du test à $2,5\text{atm}$). En combinant ces deux erreurs, on obtient une erreur totale de $\pm 7,1\%$ sur la mesure du capteur de pression. Finalement, pour le thermocouple de type K, les spécifications techniques (présentées à l'ANNEXE II) indiquent une précision à l'intérieur de 2K. À ceci, on doit ajouter l'erreur attribuable à l'opérateur qui a été jugée comme étant de $\pm 1\text{K}$ lors de la lecture et l'arrondissement de la mesure. La somme de ces erreurs donne une erreur totale de $\pm 3\text{K}$.

2.6.3 Précision du système d'acquisition

Afin de transférer les images obtenues avec la caméra en données expérimentales, le logiciel de traitement d'image *spotlight* est utilisé. Dans la majorité des cas, il existe une zone d'incertitude au niveau de la définition du front du jet. Cette incertitude engendre ainsi une erreur. L'image présentée à la Figure 2.2 démontre à quel point cet exercice peut être ambigu. Dans certains cas, il devient difficile de déterminer où se trouve réellement le front du jet.

Dans certains cas, cette zone d'incertitude peut être aussi grande que ± 10 pixels. Sachant qu'un pixel mesure en réalité 0.106mm, l'erreur potentielle peut être exprimée comme étant de $\pm 1,06\text{mm}$.

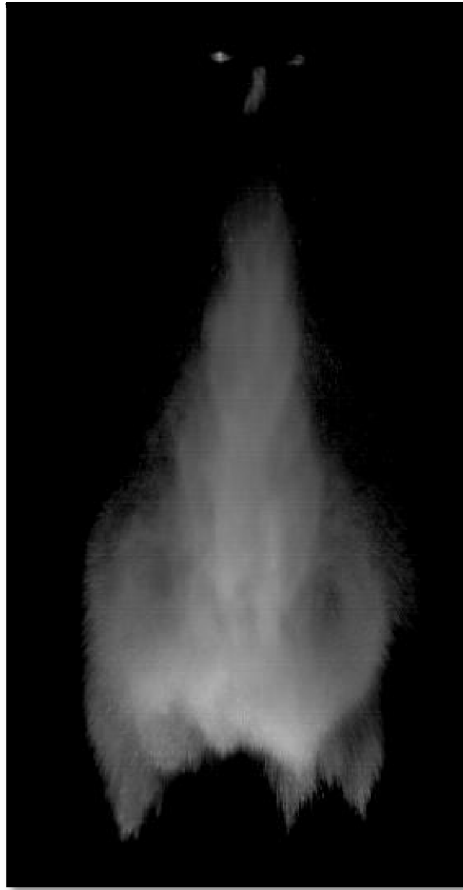


Figure 2.2 Démonstration de l'ambiguïté liée à la définition du front du jet

Le système d'acquisition de données comporte une autre incertitude. Cette fois, il s'agit d'une erreur temporelle. Puisque les mécanismes de levée d'aiguille ne sont pas bien maîtrisés, le début de l'injection se fait toujours quelque part entre deux images. Ceci a comme conséquence que le moment $t=0$ doit être extrapolé des courbes de pénétration. Subséquemment, l'erreur potentielle se trouve à être la demie de l'intervalle des prises d'image. Donc l'erreur temporelle liée au système d'acquisition est de $\pm 0,125\text{ms}$.

2.7 Sommaire du chapitre

Ce chapitre s'est voulu un survol détaillé des démarches expérimentales. L'objectif était de présenter le montage, les carburants, les conditions de tests ainsi que les méthodes de post traitement dans le but d'établir la base expérimentale. De plus, les principales sources d'erreur ont été abordées. Cependant, leur répercussion globale sur les courbes expérimentales sera discutée dans le chapitre 5, portant sur la validation du modèle empirique. Le prochain chapitre présentera les résultats obtenus durant les essais et soulignera les tendances expérimentales.

CHAPITRE 3

ANALYSE DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES

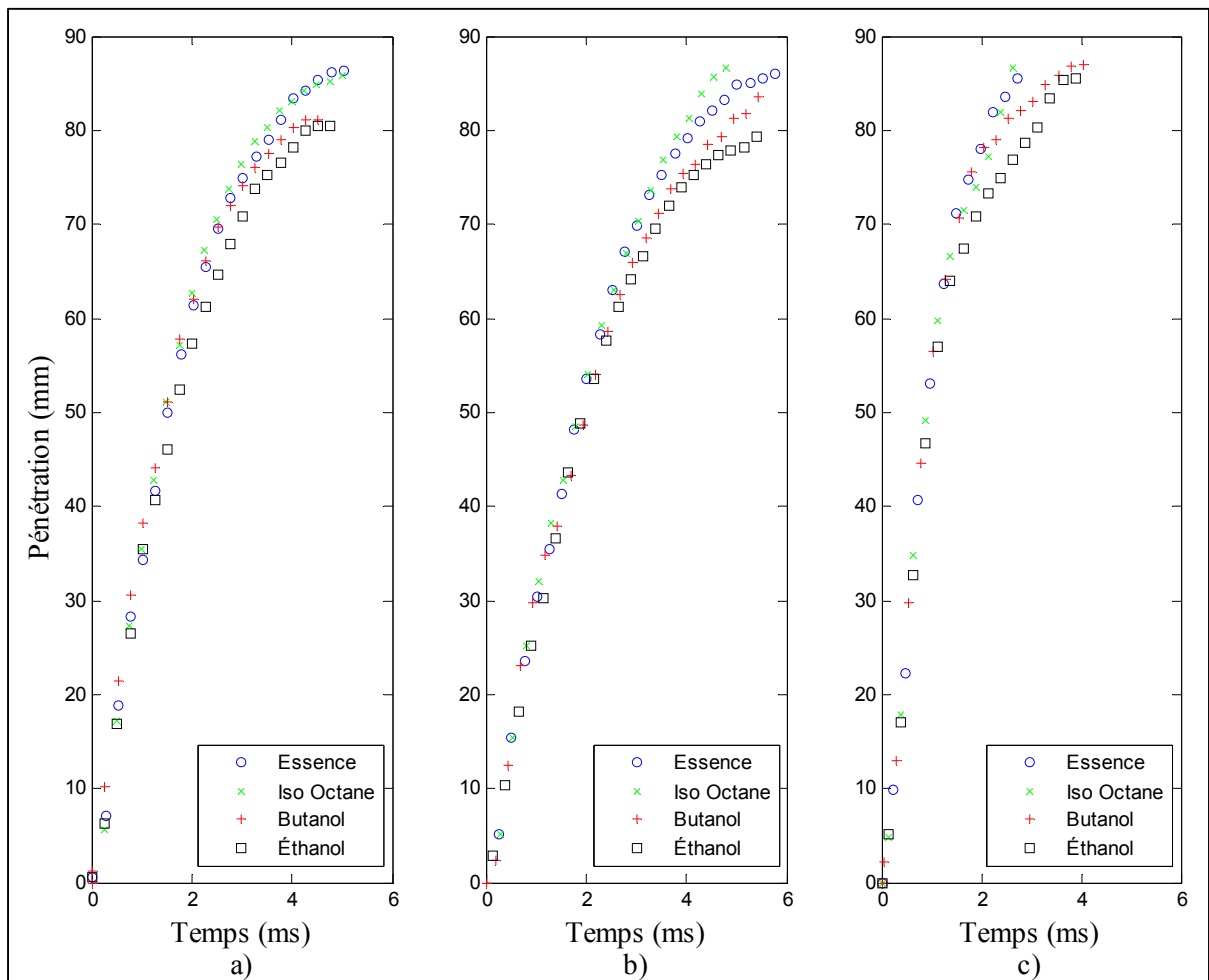
3.1 Introduction

Suite à l'acquisition et le post traitement des données, une analyse des résultats expérimentaux a été réalisée. Les courbes de la pénétration du front de jets ont été tracées pour tous les essais. Le contenu de ce chapitre est basé sur l'analyse de l'influence des variables à l'étude sur la pénétration d'un jet de carburant. Dans un premier temps, les propriétés physiques des différents carburants seront étudiées pour différentes conditions d'opération. Ceci permettra d'enchaîner avec l'influence de la pression d'injection, puis de la pression ambiante, de la température ambiante et finalement, de la durée d'injection. De plus, une sous-section portera sur l'influence de ces derniers paramètres sur l'angle de cône. Cependant ce sujet sera traité que sommairement puisque les résultats expérimentaux ne permettent pas une analyse approfondie. Ainsi, ce chapitre permettra de répondre aux deux premiers sous-objectifs définis à la section 1.4 c'est-à-dire de caractériser les mécanismes prédominants liés à l'environnement d'injection et de déterminer de quelles façons les propriétés physiques des carburants affectent les courbes de pénétration. Toutefois, il est à noter que les analyses effectuées seront plutôt qualitatives que quantitatives. Les discussions seront basées sur des observations et des tendances.

3.2 Influence des propriétés physiques des carburants

Comme présenté dans le Tableau 2.1 du chapitre 2, les propriétés physiques des carburants peuvent varier de façon considérable. Maintenant, il devient intéressant de voir comment ces distinctions se répercutent sur la pénétration du jet. Le Graphique 3.1 présente trois essais représentatifs des conditions de la matrice d'essai présentée au Tableau 2.2. Le temps d'injection et la température demeurent inchangés avec des valeurs respectives de 2ms et 300K. Un autre aspect important à mentionner est que la dimension des ports optiques

restreint le champ de vision de la caméra à 87mm. Certains des jets de carburants pénétraient au-delà de cette distance. Il est, tout de même, possible d'observer une tendance au niveau du comportement général associé aux carburants.



Graphique 3.1 Pénétration du jet en fonction du temps pour quatre carburants :

a) $P_{inj} = 8\text{MPa}$ et $P_{amb} = 5\text{atm}$; b) $P_{inj} = 5\text{MPa}$ et $P_{amb} = 5\text{atm}$;

c) $P_{inj} = 8\text{MPa}$ et $P_{amb} = 1\text{atm}$

Bien que le Graphique 3.1 illustre des tendances d'ensemble qui correspondent aux variations de pression d'injection et pression ambiante, il est important de bien identifier la prédisposition des carburants à se comporter de façon similaire pour chacune des trois conditions. À première vue, il semble que les courbes soient toutes divisibles en deux régimes distincts. Initialement, le front du jet semble progresser de façon linéaire. Puis, le

front commence à perdre de la vitesse et sa pente se met à tendre vers zéro. Cette transition survient près du temps correspondant à la fermeture de l'injection (2ms, dans le présent cas). Afin de faciliter l'analyse, le nom de régime linéaire sera donné au premier et le nom de régime décroissant sera donné au second. Pour le régime linéaire, seulement une très légère variation de la pente peut être observée, ce qui suggère que les propriétés physiques n'ont pas une influence notable sur la pente de pénétration du jet et qui s'avère être la vitesse du jet. En effet, tous les points semblent être en ligne jusqu'à ce que le jet passe en régime décroissant. Les travaux de Suh *et al.* (2008), réalisés avec le diesel, suggèrent que les propriétés physiques, telles que la viscosité et la tension de surface peuvent se répercuter sur la vitesse moyenne du jet, mais cette tendance n'est pas observée au Graphique 3.1. Il y a, cependant, une différence notable au niveau de la pente du régime linéaire lorsque les trois cas sont comparés (a, b et c du Graphique 3.1). Ceci suggère que seulement les conditions d'injection influencent le régime linéaire (ceci est vrai à 300K). En contrepartie, une réelle différence au niveau des courbes de pénétration peut être observée dans le régime décroissant pour des conditions d'essais fixes (pression d'injection et pression environnante). À partir d'un certain temps, les courbes commencent à se séparer. C'est à ce point qu'une tendance commence à être notable. En effet, pour les trois points à l'étude, l'éthanol est invariablement le carburant qui a la pénétration la plus faible, suivi du butanol alors que l'essence et l'iso-octane sont les carburants qui pénètrent le plus, ce qui confirme l'utilisation fréquente de l'iso-octane comme substitut à l'essence. Donc, de façon générale, il peut être conclu que les alcools pénètrent moins que l'essence. Ceci est en accord avec les travaux de Gao *et al.* (2007) qui ont démontré que l'éthanol pénètre moins que l'essence.

Pour tenter de comprendre les mécanismes en présence, le cas de l'éthanol sera comparé à celui de l'iso-octane. Ces deux cas correspondent respectivement au carburant qui pénètre le moins et celui qui pénètre le plus. Les propos suivants sont basés sur les propriétés physiques contenus dans le Tableau 2.1. Parmi les propriétés physiques à l'étude, il y a, tout d'abord, la masse volumique. Il s'avère que l'éthanol possède la masse volumique la plus élevée, et l'iso-octane, la plus faible (781 kg/m^3 comparé à 688 kg/m^3). Il est donc plausible qu'il y ait un lien inversement proportionnel entre la pénétration et la masse volumique du carburant.

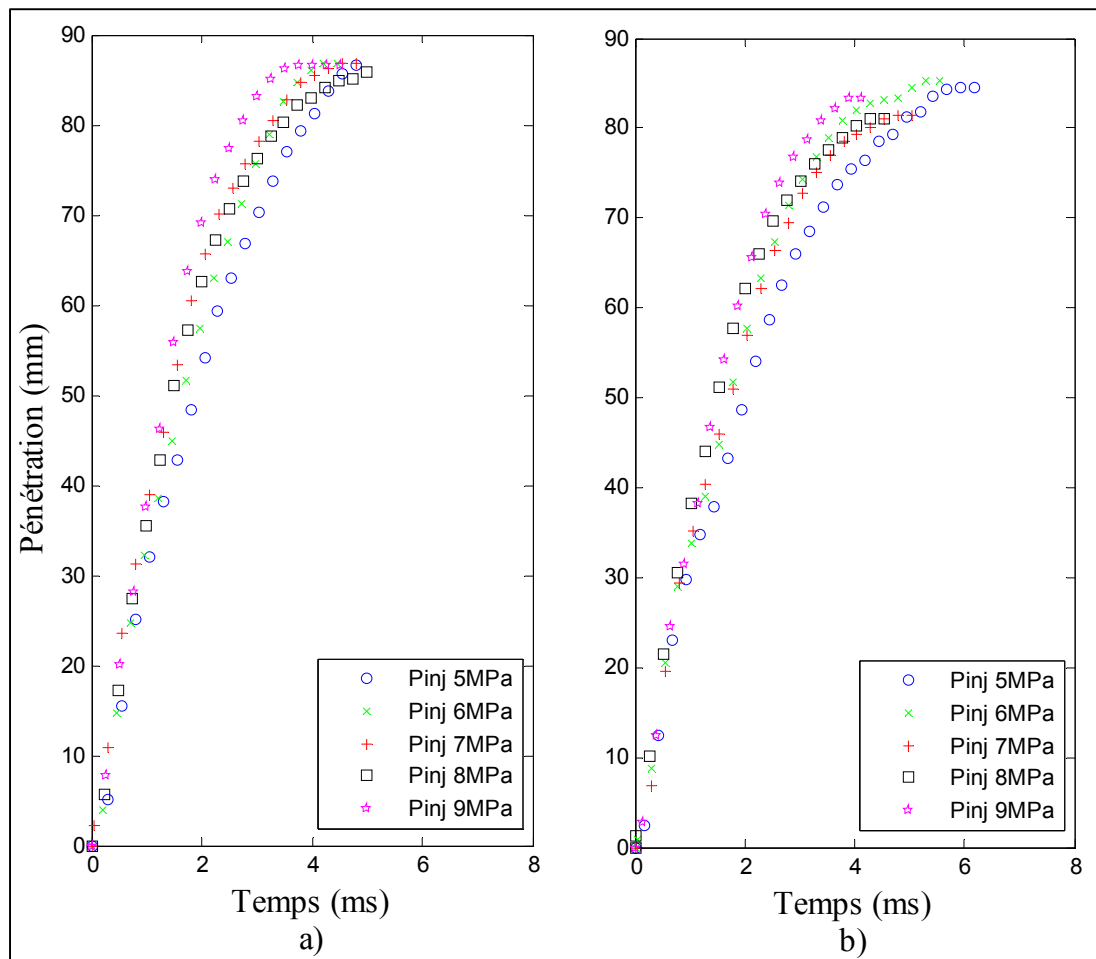
Ensuite, une deuxième propriété physique intéressante est la température d'ébullition. À première vue, la température d'ébullition de l'iso-octane ne semble pas se démarquer de celle des autres carburants. On remarque, cependant, que l'éthanol possède la température d'ébullition la plus basse (351K), ce qui suggère que certains mécanismes évaporatifs pourraient être plus importants avec l'éthanol que l'iso-octane. Finalement, une comparaison au niveau de l'enthalpie de vaporisation peut être faite pour ces deux carburants. En effet, une différence considérable peut être remarquée. L'enthalpie de vaporisation de l'éthanol est non seulement la plus élevée de toutes, mais elle est 2.7 fois plus élevée que celle de l'iso-octane. Puisque l'enthalpie de vaporisation est directement liée à l'énergie nécessaire pour évaporer un carburant, il semble, encore une fois, que certains mécanismes évaporatifs pourraient être responsables des tendances observées.

En somme, cette section a permis de souligner le fait qu'il semble, de façon générale, que les alcools pénètrent moins que l'essence et l'iso-octane. De plus, parmi les alcools, l'éthanol est le carburant qui pénètre le moins suivi du butanol. Ceci permet de répondre, en partie, au deuxième sous-objectif qui constitue à déterminer de quelles façons les propriétés physiques des carburants affectent les courbes de pénétration. À la section 3.7, on verra de quelle façon les différents carburants influencent l'angle de cône. Pour les sections qui suivent, il sera sous-entendu que ce comportement vis-à-vis la pénétration des carburants sera constant, et ainsi seulement quelques exemples seront utilisés pour compléter l'analyse.

3.3 Influence de la pression d'injection du carburant

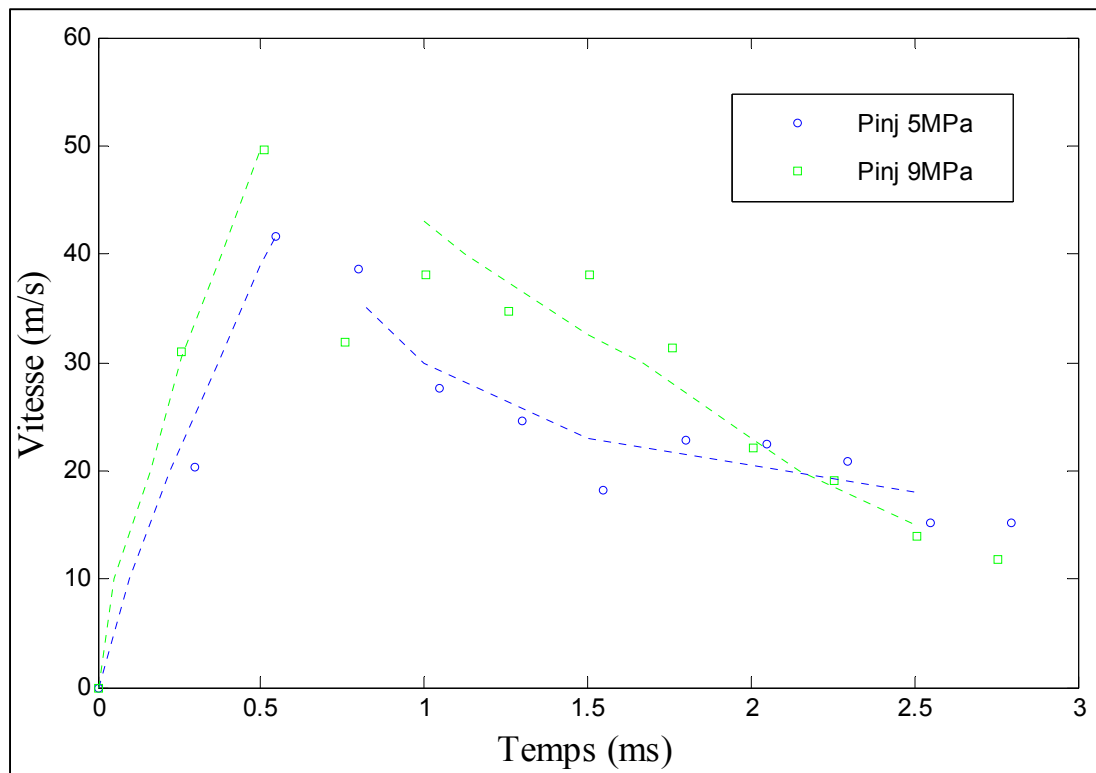
La pression d'injection a plusieurs effets sur la structure du jet. En effet, ce terme fait partie intégrante du terme global de différentiel de pression (ΔP). C'est la différence entre la pression d'injection et la pression ambiante qui force le carburant à sortir de l'injecteur. Intuitivement, il serait correct de croire qu'une plus grande pression d'injection se traduise par une pénétration plus importante. Cependant, il sera vu que ceci n'est pas toujours nécessairement le cas. En effet, les corrélations pour le SMD trouvées dans la littérature (i.e. Borman et Ragland (1998)) montrent bien qu'une augmentation de la pression d'injection se

traduit par une diminution du SMD, ce qui, à son tour, peut avoir des répercussions importantes sur la pénétration. Dans cette sous-section, on démontrera d'abord qu'une augmentation de la pression d'injection se traduit par une augmentation de la vitesse initiale du jet. Par la suite, il sera vu que la vitesse joue un rôle déterminant au niveau de la taille des gouttelettes et qu'une vitesse accrue réduit le SMD du jet. Finalement, l'équation de l'aérodynamique d'une goutte viendra démontrer qu'une gouttelette de taille inférieure est plus affectée par la traînée ce qui la freine davantage. Le Graphique 3.2 illustre bien de quelle façon la pression d'injection affecte la forme de la courbe de pénétration. Puisque l'influence des carburants a déjà été traitée, seulement les courbes de l'iso-octane et du butanol sont présentées ci-dessous afin de ne pas alourdir inutilement le texte.



Graphique 3.2 Pénétration du jet en fonction de la pression d'injection :
a) Iso-octane b) Butanol

Au Graphique 3.2, la pression ambiante est maintenue à 5 atmosphères et la température dans l'enceinte est de 300K. Le premier aspect intéressant observé est que pour les deux cas, une distinction dans la pente du régime linéaire apparaît. Il a été vu, au Graphique 3.1, que les propriétés physiques ne semblent pas changer la pente de ce régime. Cependant, une augmentation de la pression d'injection résulte en une vitesse de sortie, ou vitesse initiale, plus élevée (voir Stiesch (2003), Roisman *et al.* (2007), Delacourt *et al.* (2005)). Logiquement, l'apport supplémentaire en pression augmente l'énergie potentielle du carburant et de ce fait, sa vitesse initiale. À titre indicatif, le Graphique 3.3 présente l'évolution de la vitesse d'un jet d'iso-octane pour des pressions d'injection de 5 et 9MPa. Les courbes de vitesses sont obtenues en dérivant dans le temps les courbes de pénétration.



Graphique 3.3 Vitesse initiale d'un jet d'iso-octane en fonction de la pression d'injection

Le Graphique 3.3 illustre l'effet de la variation de la pression d'injection sur la vitesse du jet. On remarque qu'une augmentation de la pression d'injection se traduit par une augmentation de la vitesse. Par ailleurs, ces courbes semblent posséder deux parties distinctes; tout d'abord,

lorsque la vitesse croît et, par la suite, lorsque la vitesse décroît, le tout séparé par le maximum de vitesse, situé aux alentours de 0,5ms – 0,75ms. Concrètement, ce point semble survenir tout juste après la fin de l'ouverture complète du pointeau de l'injecteur. En effet, comme il est indiqué dans les spécifications du manufacturier (voir ANNEXE I), la durée d'ouverture du pointeau de l'injecteur est de 0,455ms. Le Graphique 3.3 s'apparente beaucoup à la figure que propose Delacourt *et al.* (2005) pour caractériser l'évolution de la vitesse du jet lors d'une injection. En effet, ces derniers obtiennent le même sommet et ce, très peu de temps après la fin de la levée de l'aiguille de l'injecteur. Ils expliquent que la vitesse maximale se produit lorsque le coefficient de décharge est, lui aussi, à sa valeur maximale ce qui coïncide avec l'ouverture complète de l'injecteur. Ce phénomène est aussi observé par Kostas *et al.* (2009). Ils attribuent l'augmentation initiale de la vitesse du jet à l'ouverture de l'injecteur. Cependant, ils expliquent que d'autres mécanismes semblent aussi être en cause puisque le temps auquel survient la valeur maximale de la vitesse pourrait aussi être influencé par la pression d'injection et la pression ambiante. Cependant, le nombre d'images obtenu dans le cadre de ce travail n'est pas suffisant pour investiguer davantage les phénomènes liés au soulèvement de l'aiguille de l'injecteur. L'essentiel du Graphique 3.3 est de comprendre que la vitesse n'est pas constante durant l'injection et que la pression d'injection influence cette vitesse. Cela dit, il peut être affirmé que la pression d'injection influence directement la vitesse de sortie du carburant, ainsi que son maximum de vitesse. Pour supporter cette affirmation, l'équation simplifiée de Bernoulli peut être manipulée pour mettre en valeur la dépendance de la vitesse du jet sur la pression d'injection. Tout d'abord voici l'équation simplifiée de Bernoulli (écoulement permanent, incompressibilité, aucun frottement visqueux, adiabatique), qui peut être tiré d'un livre de mécanique des fluides tel que Çengel et Cimbala (2006), adaptée au contexte d'un injecteur.

$$P_{inj} + \frac{\rho_{carb} U_{inj}^2}{2} = P_{amb} + \frac{\rho_{carb} U_{sortie}^2}{2} \quad (3.1)$$

Tout d'abord, il est assumé que la vitesse du carburant (U_{inj}) dans l'injecteur est égale à zéro. Ensuite, on isole le paramètre U_{sortie} .

$$U_{sortie} \propto \sqrt{\frac{2(P_{inj} - P_{amb})}{\rho_{carb}}} \quad (3.2)$$

L'équation 3.2 illustre clairement qu'une augmentation de la pression d'injection se traduit par un accroissement de la vitesse de sortie du jet. Cependant, il est important de noter que les effets de frottements et de contraction du jet ne sont pas pris en compte par l'équation 3.2. Dans la littérature (Stiesch (2003), Roisman *et al.* (2007), Delacourt *et al.* (2005)), l'équation 3.2 est majorée par un coefficient qui prend en compte les pertes par frottement lorsqu'il est s'agit d'écoulement confiné. Ici, il est question du coefficient de décharge, C_{De} . Revenant au Graphique 3.2, on peut maintenant conclure que, lors du régime linéaire, la différence des pentes est attribuable, en partie, à une variation au niveau de la vitesse du jet, attribuable à la pression d'injection.

À présent, il sera vu de quelle façon la vitesse initiale du jet affecte les mécanismes de rupture de jets. Par la suite, le lien entre l'aérodynamique des gouttelettes d'un jet et leur taille sera établi dans le but d'expliquer les tendances observées dans le Graphique 3.2. Dans le domaine d'étude des jets, le paramètre quantifiant l'importance relative des forces aérodynamiques par rapport à la tension de surface d'un liquide est nommé nombre de Weber. Ce nombre a été discuté à la section 1.2 (éq. 1.1), et son équation est présentée de nouveau.

$$We = \frac{\rho_{amb} \cdot \bar{U}^2 \cdot L}{\sigma_{carb}}$$

On remarque que le nombre de Weber croît avec le carré de la vitesse moyenne. Ainsi, la valeur maximale du nombre de Weber coïncidera avec celle de la vitesse max, comme illustré au Graphique 3.3. Pour des fins de comparaison, le Tableau 3.1 présente la valeur du nombre de Weber évaluée pour les données du Graphique 3.3, soit l'iso-octane injectée à 5MPa et 9MPa. La valeur de la longueur caractéristique L est fixée à 0,0001m ce qui correspond à l'ordre de grandeur du trou de l'injecteur (mesurée à 0,00015m).

Tableau 3.1 Calcul du nombre de Weber pour deux cas d'injection d'iso-octane

P_{inj} (Mpa)	ρ_{amb} (kg/m ³)	U (m/s)	σ^3 (N/m)	L (m)	We
5	6	41	0,018	0,0001	56,0
9	6	50	0,018	0,0001	83,3

Le Tableau 3.1 illustre de quelle façon l'augmentation de la pression d'injection se répercute sur le nombre de Weber. De façon générale, plus le nombre de Weber est élevé, plus les mécanismes de rupture seront violents entraînant une fragmentation rapide de la goutte et qui résultera en un SMD de jet plus faible. Le mécanisme de fragmentation d'un jet est gouverné par les forces aérodynamiques qui créent des instabilités à la surface, soit du jet, soit des gouttelettes individuelles et ce sont ces instabilités qui fragmentent le jet. La Figure 3.1 illustre le lien entre le nombre de Weber et les mécanismes de fragmentation de jets.

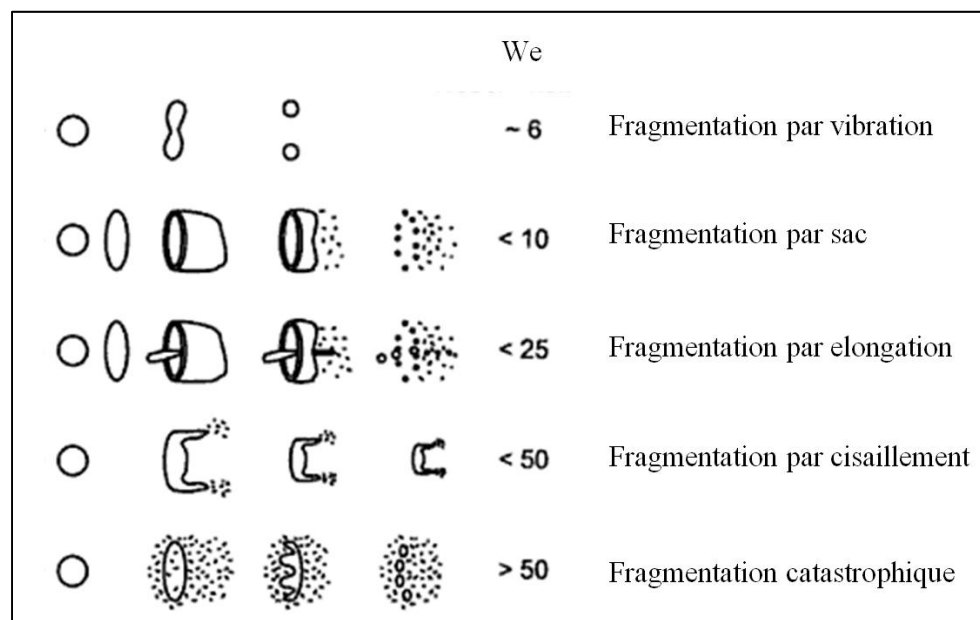


Figure 3.1 Schématisation de la fragmentation associée à différents nombre de Weber⁴

³ Yaws (2003)

⁴ Adapté de Stiesch (2003), page 154

À présent, afin d'illustrer de quelle façon la traînée se répercute sur les gouttelettes, l'équation suivante, d'abord présentée à l'équation 1.4, arbore les principales variables qui gouvernent la dynamique de gouttelettes individuelles. Cette équation est, entre autres, utilisée par Sazhin *et al.* (2003).

$$\frac{d^2s}{dt^2} = -\frac{3}{4 \cdot d_g} \cdot C_D \cdot \frac{\rho_{amb}}{\rho_{carb}} \cdot U_{rel,g}^2$$

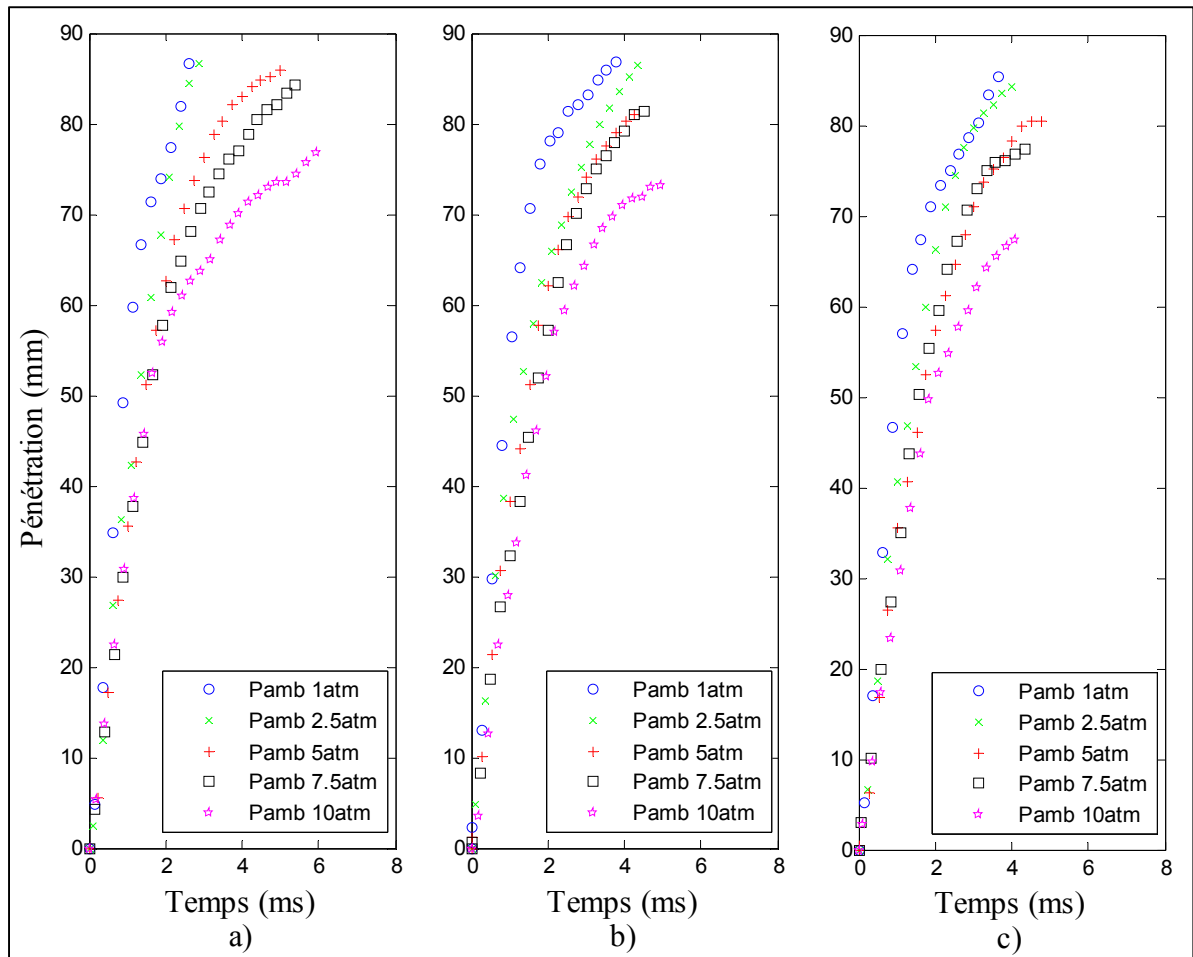
Cette équation démontre que, toutes autres choses demeurant égales, une diminution globale de la taille des gouttelettes (d_g) se traduit par une décélération accrue et conséquemment une pénétration réduite. Le Graphique 3.2 illustre bien ces propos, particulièrement celle du butanol. Bien que la pente soit plus élevée pour une pression d'injection de 9MPa, la pénétration totale n'est pas pour autant accrue. En fait, la pénétration totale demeure pratiquement inchangée pour tous les cas. Toutefois, une pression d'injection supérieure permet d'atteindre la pénétration maximum plus rapidement, gracieuseté d'une vitesse plus élevée.

Pour terminer, la pression d'injection joue un rôle primordial dans les mécanismes d'atomisation et de rupture de jets. Durant le régime linéaire de la courbe de pénétration, une augmentation de la pression produit une pente plus abrupte provoquée par une vitesse initiale en hausse. Cependant, une augmentation de la vitesse produit des gouttelettes plus fines, ce qui nuit à la pénétration totale du jet durant le régime décroissant.

3.4 Influence de la pression environnante

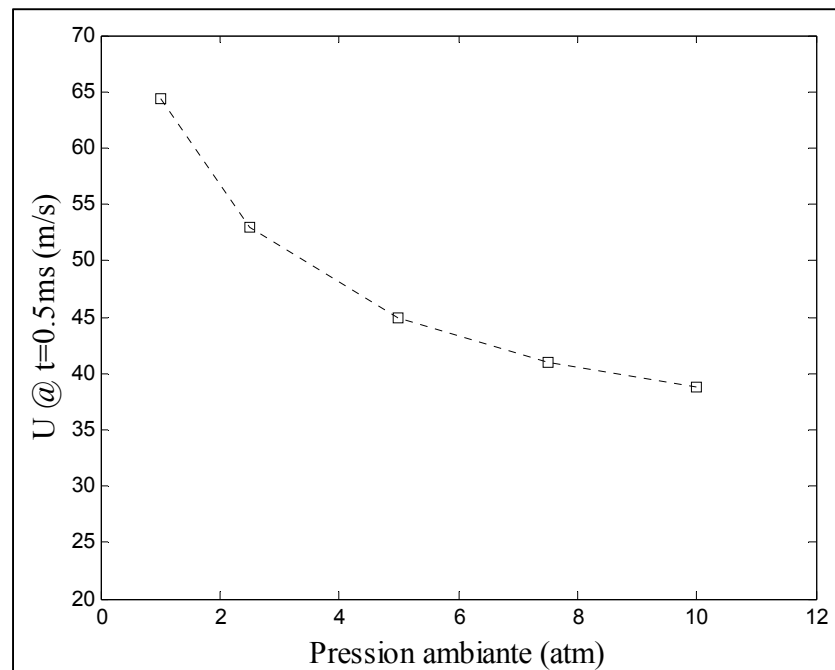
Jusqu'à présent, il a été vu que les propriétés physiques influencent probablement uniquement la pénétration totale et que la pression d'injection influence principalement la pente du régime linéaire, mais pas particulièrement la pénétration totale. Dans cette section, il sera démontré que la pression ambiante influence à la fois la vitesse de sortie du jet, exprimé par la pente du régime linéaire, ainsi que la distance totale pénétrée et ce, de façon

considérable. Tout d'abord, bien que la pression ambiante fasse partie du paramètre de différentiel de pression (ΔP), la plage de tests réalisés pour la pression ambiante ne fait pas varier le ΔP de façon considérable. Autrement dit, l'étendue des tests réalisés couvre approximativement 0,9MPa, contrairement aux tests de pression d'injection qui eux couvriraient une plage de 4MPa. Cependant, la variation de la pression ambiante affecte un paramètre crucial dans la balance des forces en présence : la masse volumique de l'air ambiant. Le Graphique 3.4 présente l'influence de la pression ambiante sur la pénétration du jet pour trois différents carburants : l'iso-octane, le butanol et l'éthanol. Cette fois, la pression d'injection est maintenue à 8MPa, la température ambiante et la durée d'injection demeurent inchangées avec des valeurs respectives de 300K et 2ms.



Graphique 3.4 Pénétration du jet en fonction de la pression ambiante :
a) Iso-octane b) Butanol c) Éthanol

Le Graphique 3.4 démontre à quel point la pression ambiante a de l'influence sur tous les aspects de la courbe de pénétration. Effectivement, les trois graphiques montrent une variation de la pente initiale. Il a été vu, à la section 3.3, que la vitesse initiale est principalement influencée par la quantité de mouvement, la fragmentation du jet et les forces aérodynamiques. Cependant, à la section 3.2, il a été vu que ni la masse volumique ni les autres propriétés physiques des carburants n'ont le poids nécessaire pour affecter, de façon considérable, la pente du régime linéaire. Puisque, dans ce cas-ci, la pression d'injection est maintenue constante, la quantité de mouvement ne peut être tenue responsable de la variation de la pente du régime linéaire. Il s'avère donc que les forces aérodynamiques, notamment la traînée, sont responsables de ces différences de vitesses. Pour démontrer de quelle façon ceci est possible, le Graphique 3.5 présente la vitesse à $t=0,5\text{ms}$ (valeurs interpolées) en fonction de la pression ambiante pour le cas du butanol. Cet instant est choisi, car il correspond approximativement au moment où le maximum de vitesse du jet est obtenu qui est associé au moment où l'injecteur est complètement ouvert, soit à 0.455ms après le début de l'injection, tel que présenté à la section 3.3.



Graphique 3.5 Vitesse maximale du jet en fonction de la pression ambiante

Cette technique est également utilisée par Roisman *et al.* (2007) qui démontrent que la vitesse maximale du jet décroît lorsque la pression ambiante augmente. Ceci concorde bien avec le Graphique 3.5. En effet, il s'avère que la vitesse du jet peut aussi être fortement influencée par les forces aérodynamiques. L'augmentation de la pression ambiante signifie un accroissement de la masse volumique du milieu ambiant, ce qui se reflète de deux façons. Tout d'abord, la masse volumique de l'air joue un rôle primordial au niveau de la force de traînée exercée, en premier, sur le front de jet, puis par la suite, sur les gouttelettes individuelles lorsque le jet se fragmente. Ensuite, le nombre de Weber, principal indicateur de la balance des forces en présence, est directement lié à la masse volumique de l'air par l'équation 1.1. La force de traînée qui s'exerce sur les gouttelettes est fortement influencée par les conditions du milieu ambiant ainsi que par la forme des éléments étudiés. L'équation 3.3, provenant de Çengel et Cimbala (2006), présente les éléments de base pour calculer la force de traînée.

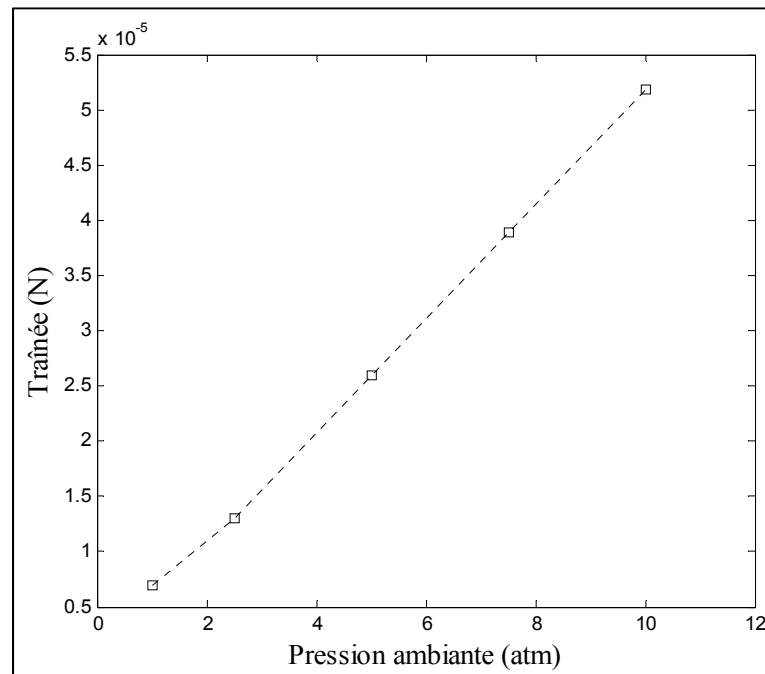
$$D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{amb} \cdot U^2 \cdot A \quad (3.3)$$

D'abord, il est possible de constater, à l'équation 3.3, que la traînée (D) est directement proportionnelle à la masse volumique du milieu ambiant et donc à la pression ambiante. Ensuite, le terme C_D qui représente le coefficient de traînée est, comme expliqué dans Munson *et al.* (2006), fonction de plusieurs paramètres tels que : le facteur de forme, le nombre de Reynolds, le nombre de Mach, le nombre de Froude et la rugosité de surface. Sazhin (2003) propose d'utiliser le coefficient de traînée des gouttelettes en fonction de plages de nombres de Reynolds comme suit : pour $Re \leq 2$, $C_D = 24/Re$, pour $2 < Re \leq 500$, $C_D = 18,5/Re^{0.6}$ et pour $500 < Re \leq 10^5$, $C_D = 0.44$. À partir de ces corrélations, la traînée associée à une goutte de 0,1mm a été calculée pour des conditions constantes à l'exception de la pression ambiante qui, elle, a été variée. Les résultats obtenus sont présentés au Tableau 3.2 et le Graphique 3.6 illustre de quelle manière la pression ambiante impacte la traînée. Le nombre de Reynolds se calcule à l'aide de l'équation suivante : $Re = (\rho_{amb} U d_g)/\mu_{amb}$.

Tableau 3.2 Éléments de calcul pour déterminer la traînée

P_{amb} (atm)	ρ_{amb} (kg/m ³)	U (m/s)	d_g (m)	μ_{amb}^5 (kg/ms)	Re	C_D	D (N)
1	1,2	50	0,0001	1,90E-05	315,8	0,59	6,9E-06
2,5	3	50	0,0001	1,90E-05	789,5	0,44	1,3E-05
5	6	50	0,0001	1,90E-05	1578,9	0,44	2,6E-05
7,5	9	50	0,0001	1,90E-05	2368,4	0,44	3,9E-05
10	12	50	0,0001	1,90E-05	3157,9	0,44	5,2E-05

Le Tableau 3.2 montre d'abord qu'une augmentation de la pression environnante entraîne un accroissement du nombre de Reynolds ce qui augmente ainsi la valeur de la traînée. En présentant la traînée calculée pour une gouttelette en fonction de la pression ambiante, il devient possible d'expliquer la réduction de pénétration du jet, composé d'une grande quantité de gouttelettes, lorsque P_{amb} augmente.



Graphique 3.6 Traînée en fonction de la pression du milieu ambiant

⁵ Yaws (2003)

La pression ambiante se répercute en premier sur la vitesse initiale du jet en réduisant ΔP , puis, sur la décélération globale du jet en freinant les gouttelettes par une augmentation de la traînée. Maintenant, il sera démontré que la pression ambiante a aussi une influence très forte sur les mécanismes de fragmentation du jet. Pour ce faire, le nombre de Weber est calculé pour deux conditions de P_{amb} différentes et ce, pour une goutte de butanol dont la vitesse du jet est déterminée à l'aide du Graphique 3.5. Comme mentionné à la section 3.3, plus le nombre de Weber est élevé, plus le jet a tendance à se fragmenter en gouttelettes de petites tailles. Ainsi le Tableau 3.3 montre qu'une augmentation de la pression ambiante entraîne à son tour une augmentation du nombre de Weber.

Tableau 3.3 Éléments de calcul du nombre de Weber pour deux cas d'injection de butanol

P_{amb} (atm)	ρ (kg/m ³)	U (m/s)	σ (N/m)	L (m)	We
1	1,2	65	0,025	0,0001	20,3
10	12	38	0,025	0,0001	69,3

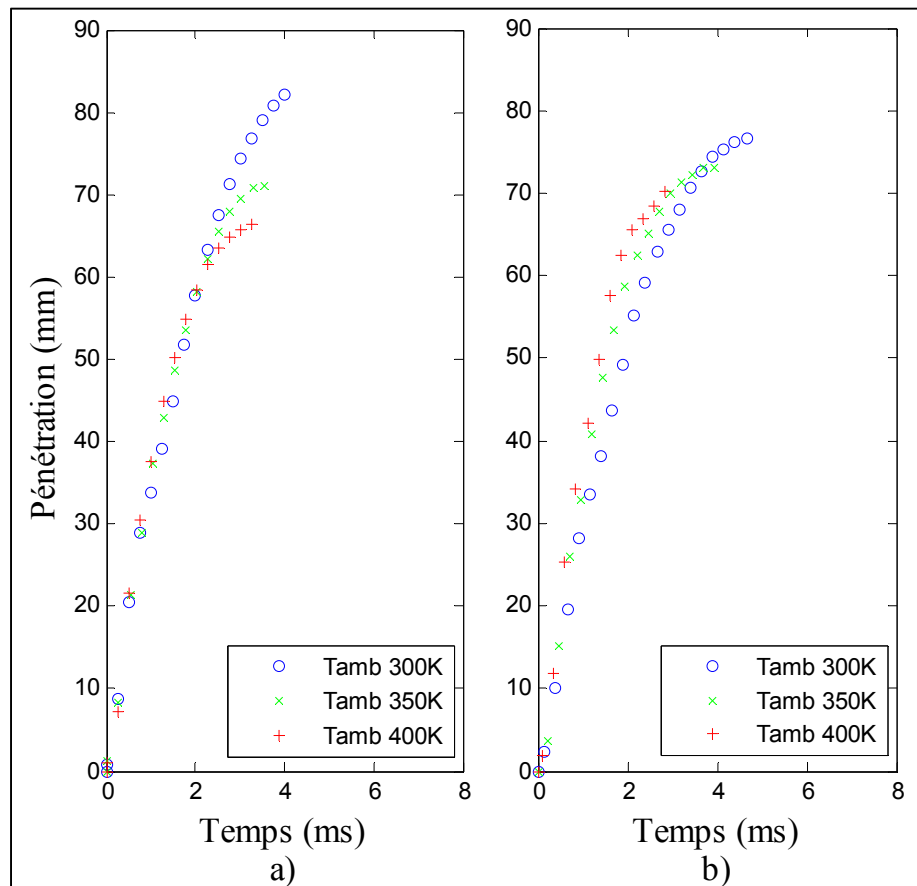
Donc, bien qu'une pression ambiante faible soit propice à une vitesse de jet plus élevée, l'importance relative de la masse volumique, dans l'équation du nombre de Weber (eq. 1.1), est plus grande et réduit la valeur du nombre de Weber par rapport à une pression ambiante plus élevée. Quantitativement, une augmentation de dix fois la masse volumique se traduit par une augmentation d'environ trois fois et demie du nombre de Weber. Donc une faible P_{amb} résulte en une vitesse de jet élevée qui est accompagnée par un nombre de Weber faible, permettant ainsi une taille moyenne des gouttelettes supérieure ce qui, selon l'équation 1.4 favorise la pénétration du jet.

En résumé, ce qui provoque une faible pénétration pour le cas avec une pression ambiante de 10atm est une combinaison de facteurs qui travaille ensemble pour freiner le jet. Tout d'abord, la vitesse initiale est diminuée par une force de traînée accrue. Ensuite, malgré une vitesse réduite, le nombre de Weber demeure élevé, de par un milieu plus dense, ce qui favorise la fragmentation du jet en plus fines gouttelettes. Finalement, l'équation de

dynamique de gouttelettes individuelles (éq. 1.4) montre une décélération accrue pour, à la fois, un diamètre moyen réduit et une masse volumique du milieu ambiant supérieure. En terminant, la pression ambiante influence fortement les courbes de pénétration puisque les facteurs ayant un poids relatif important sur la pénétration travaillent dans la même direction.

3.5 Influence de la température environnante

La température du milieu ambiant joue un rôle de premier plan en ce qui a trait à l'évaporation du carburant. Dans la série de tests effectuée, tous les autres paramètres sont constants et seule la température peut avoir un effet sur le jet. C'est ce qui est illustré au Graphique 3.7 qui a été réalisé aux conditions de tests suivantes : $P_{inj} = 6\text{MPa}$, $P_{amb} = 5\text{atm}$ et ce, pour le butanol et l'éthanol.



Graphique 3.7 Pénétration du jet en fonction de la température ambiante :
a) Butanol b) Éthanol

Le Graphique 3.7 montre que l'influence de la température sur les courbes de pénétrations de jet n'est pas la même pour tous les carburants. En effet, deux comportements assez différents peuvent être observés. Ceci s'explique par le fait qu'avec l'augmentation de la température du milieu ambiant, intervient maintenant l'évaporation du carburant et un changement de masse volumique ambiante qui influence, entre autres, la vitesse initiale du jet. Le comportement des carburants en termes d'évaporation dépend de leurs propriétés physiques. Parmi celles-ci, les plus importantes ont été identifiées comme étant, entre autres, l'enthalpie de vaporisation et la température d'ébullition. Il est aussi important de mentionner que les propriétés physiques des gouttelettes de carburants dépendent, à la fois, des conditions du milieu ambiant et de la température du carburant.

Dans le but de tenter d'expliquer la tendance observée au Graphique 3.7, l'analogie avec l'évaporation de gouttelettes individuelles est effectuée. Par contre, il est important de mentionner que le comportement des gouttelettes dans un jet est très différent de celui d'une gouttelette qui s'évapore suspendue sur un fils de support. En effet, plusieurs phénomènes complexes surviennent dans un jet tels que la fragmentation et la coalescence des gouttelettes, les forces aérodynamiques qui affectent la dynamique de celles-ci, la présence de vapeur dans le jet qui nuit à l'évaporation des gouttelettes, etc. Ainsi, les conclusions qui pourraient être tirées de cette analyse doivent être prises en comprenant bien ces limitations.

Que ce soit individuellement ou dans un jet, la température interne des gouttelettes est déterminante et il faut être en mesure de bien comprendre comment celle-ci varie. Selon Borman et Ragland (1998), lorsqu'une gouttelette est soumise à un environnement chauffé, sa température interne tend vers une température d'équilibre qui se trouve entre sa température d'ébullition et sa température initiale. Cette température d'équilibre est fonction, tout d'abord, des conditions du milieu environnant, mais aussi, de la température d'ébullition du carburant. Par ailleurs, lorsqu'une goutte est soumise à un environnement ambiant de plus en plus chaud, qui surpasse même sa température d'ébullition, sa température d'équilibre tend de façon asymptotique vers sa température d'ébullition. La température d'équilibre est essentielle dans le calcul du taux d'évaporation massique du carburant. En effet, pour un

carburant donné, il est important de tenter de quantifier sa sensibilité à une augmentation de la température ambiante. Ainsi, le bilan d'équilibre énergétique d'une gouttelette de carburant peut être simplement représenté par l'énergie qui entre dans la gouttelette (chaleur convective) égale celle qui en ressort (flux d'évaporation massique). Ceci est uniquement présenté dans un contexte qualitatif, Ce bilan est représenté ci-dessous, par l'équation 3.4.

$$h_{chal} A_g (T_{amb} - T_g) \cong \dot{m} h_{fg} \quad (3.4)$$

De cette équation, la valeur du taux massique d'évaporation ($\dot{m}$) est isolée comme suit;

$$\dot{m} \cong \frac{h_{chal} A_g (T_{\infty} - T_{eq})}{h_{fg}} \quad (3.5)$$

L'équation 3.5 (Borman et Ragland (1998)) démontre que le taux massique d'évaporation dépend du différentiel de température, ΔT (différence entre la température environnante et la température de la gouttelette), de l'enthalpie de vaporisation (h_{fg}) ainsi que du coefficient de transfert de chaleur (h_{chal}). Quoique le fait de représenter l'évaporation de gouttelettes dans un jet par celle de gouttelettes individuelles comporte plusieurs limitations, les logiciels de CFD tels que Star CD (2010) et Fluent (2006) utilisent les équations qui sont présentées ici lors des calculs de transferts de masse et de chaleur des gouttes d'un jet de carburant. D'abord, les équations 3.6 à 3.8 sont nécessaires pour le calcul de h_{chal} (Incropera *et al.* (2007)).

$$h_{chal} = Nu \frac{k_{amb}}{d_g} \quad (3.6)$$

$$Nu = 2 + 0.6 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (3.7)$$

$$Re = \frac{\rho_{amb} U d_g}{\mu_{amb}} \quad (3.8)$$

Ainsi, pour calculer la valeur du coefficient de transfert de chaleur, il faut connaître la conductivité thermique (k_{carb}), le diamètre de la gouttelette (d_g), ainsi que le nombre de Nusselt (Nu); celui-ci est calculé en utilisant la corrélation pour une sphère (équ. 3.7), proposée par Ranz et Marshall (1952), dans laquelle le terme Pr correspond au nombre de Prandtl. Pour des conditions ambiantes similaires, le nombre de Nusselt ne varie pas, et ainsi le coefficient de transfert de chaleur devient principalement fonction de la conductivité thermique du carburant. Pour le butanol et l'éthanol, la conductivité thermique, évaluée à 300K, prend des valeurs respectives de 0,15W/mK et 0,17W/mK, ce qui constitue un écart négligeable. Ainsi, il est possible de faire l'hypothèse que pour des conditions ambiantes similaires, seules le différentiel de température et l'enthalpie de vaporisation jouent un rôle déterminant dans le bilan énergétique présenté à l'équation 3.4. Dans un contexte où l'environnement est pressurisé, il est important de s'attarder sur l'influence de la pression environnante sur l'évaporation. C'est en effet dans ce cas que la pression de vapeur du carburant intervient. Pour ce faire, il est plus pratique d'utiliser un bilan massique au lieu d'un bilan énergétique. Analogique au bilan énergétique, le bilan massique détermine le débit massique de vapeur quittant la surface en fonction de la différence de pression totale et de la pression de vapeur du carburant à la température actuelle de la goutte. Encore une fois, il est important de préciser que ce bilan est présenté de façon qualitative et sert uniquement à tenter d'expliquer le comportement observé au Graphique 3.7. Ainsi, l'équation du bilan massique est présentée à l'équation 3.9 est elle est tirée du livre de Borman et Ragland (1998).

$$\dot{m} = \frac{h_{mas} A_g (P_{amb} - P_{vap})}{R_{carb} T_m} \quad (3.9)$$

À l'équation 3.9, le différentiel de pression (pression de vapeur soustraite à la pression ambiante) est la force gouvernante, analogique au différentiel de température du bilan énergétique, présenté à l'équation 3.4. À l'équation 3.9, le terme h_{mas} représente, cette fois-ci, le coefficient de transfert de masse, le terme R_{carb} est la constante des gaz du carburant et elle se calcule en divisant la constante universelle des gaz ($R_u = 8,314 \text{ J/molK}$) par la masse

molaire du carburant en question. Finalement, le terme T_m est la moyenne entre la température ambiante et la température de la gouttelette. Le coefficient de transfert de masse est déterminé de façon similaire au coefficient de transfert de chaleur. Les équations 3.10 à 3.12 sont utilisées pour calculer sa valeur et peuvent, elles aussi, être trouvées dans les manuels de logiciels comme Star CD (2010) et Fluent (2006).

$$h_{mas} = Sh \frac{D_{ab}}{d_g} \quad (3.10)$$

Ici, D_{ab} représente le coefficient de diffusion d'un carburant et Sh , le nombre de Sherwood présenté ci-dessous, à l'équation 3.11, alors que le nombre de Schmidt est présenté à l'équation 3.12.

$$Sh = 2 + 0.6Re^{\frac{1}{2}}Sc^{\frac{1}{3}} \quad (3.11)$$

$$Sc = \frac{\mu_{amb}}{\rho_{amb}D_{ab}} \quad (3.12)$$

μ_{amb} et ρ_{amb} représentent respectivement la viscosité dynamique et la masse volumique de l'air. Comme il a été fait pour les équations 3.6 à 3.8, il est possible de démontrer que pour des conditions environnantes similaires, le taux d'évaporation massique, présenté à l'équation 3.9 est principalement fonction du différentiel de pression pondéré par la température moyenne. Encore une fois, afin de déterminer la valeur du terme de différentiel de pression pour chacun des carburants, il faudrait connaître le comportement de la température interne d'une gouttelette. Pour démontrer la variation interne de la température de gouttelettes de carburants, les résultats expérimentaux tirés des travaux de Seers *et al.* (2010) sont utilisés pour développer un modèle analytique simplifié d'évaporation de gouttelette individuelle. Leurs travaux consistent à étudier le comportement évaporatif de différents carburants en les suspendant sur des thermocouples dans des écoulements d'air de différentes températures. L'avantage d'utiliser des thermocouples est que le suivi de la température interne de gouttelettes peut être effectué durant l'évaporation, permettant ainsi

d'obtenir de façon expérimentale, la température d'équilibre de chacun des carburants pour différentes températures ambiantes. Ses résultats expérimentaux seront utilisés afin de valider les résultats analytiques du modèle présenté.

Le modèle est uniquement utilisé afin de tenter de comprendre le comportement évaporatif de différents carburants, car il existe des différences importantes entre l'évaporation d'une goutte isolée et celles d'un jet de carburants. Parmi ces différences, on note, entre autres, que les gouttes d'un jet de carburant sont soumises à une décélération, à un environnement avec une concentration de vapeur de carburant variable, à des collisions et/ou fragmentations qui dépendent des conditions locales, etc. Toutefois en connaissant ces différences le modèle peut fournir certaines tendances qui permettent d'expliquer partiellement le comportement observé lors des expériences sur les jets de carburant. L'élaboration du modèle analytique est basée sur les équations présentées dans le livre de Borman et Ragland (1998) ainsi que celles présentées au préalable, aussi tirées de la même source. Les équations qui suivent présentent les blocs fondamentaux de ce modèle. Tout d'abord, il est important de mentionner que le réchauffement d'une gouttelette est un processus dynamique qui passe d'abord par une période transitoire. La période transitoire est définie par le temps que prend la température de gouttelette pour s'élever jusqu'à sa température d'équilibre. Durant cette période, le bilan énergétique de la gouttelette est représenté par l'équation 3.13.

$$m_g C_{p,g} \frac{dT_g}{dt} = h_{chal} A_g (T_{amb} - T_g) + Q_{cond} - \dot{m} h_{fg} \quad (3.13)$$

À l'équation 3.13, la variable m_g représente la masse actuelle de la gouttelette et $C_{p,g}$ la chaleur spécifique à pression constante Q_{cond} est la chaleur provenant du thermocouple sur lequel est suspendue la goutte. Le terme de gauche dans l'équation 3.13 décrit l'énergie interne de la gouttelette. Ainsi, l'énergie qui entre par convection et par le thermocouple est contrebalancée par celle qui sort par évaporation et se traduit par une élévation de la température de la gouttelette. La température interne atteint l'équilibre lorsque l'apport d'énergie devient égal aux pertes. Maintenant, afin de déterminer la valeur du taux massique d'évaporation, une variation de l'équation 3.9, adaptée davantage à un jet, est utilisée. Cette

équation est tirée de Borman et Ragland (1998) et sa formulation est présentée à l'équation 3.14.

$$\dot{m} = \frac{h_{mas} A_g}{R_{carb} T_m} P_\infty \ln \left(\frac{P_{amb}}{P_{amb} - P_{vap}} \right) \quad (3.14)$$

Afin de calculer la pression de vapeur de la gouttelette selon la température à laquelle elle est, l'équation de Clausius Clapeyron est utilisée (Seers (2009)). Elle est présentée ci-dessous, à l'équation 3.15.

$$P_{vap} = P_{amb} \exp \left[\frac{-h_{fg}}{R_{carb}} \left(\frac{1}{T_g} - \frac{1}{T_{ebul}} \right) \right] \quad (3.15)$$

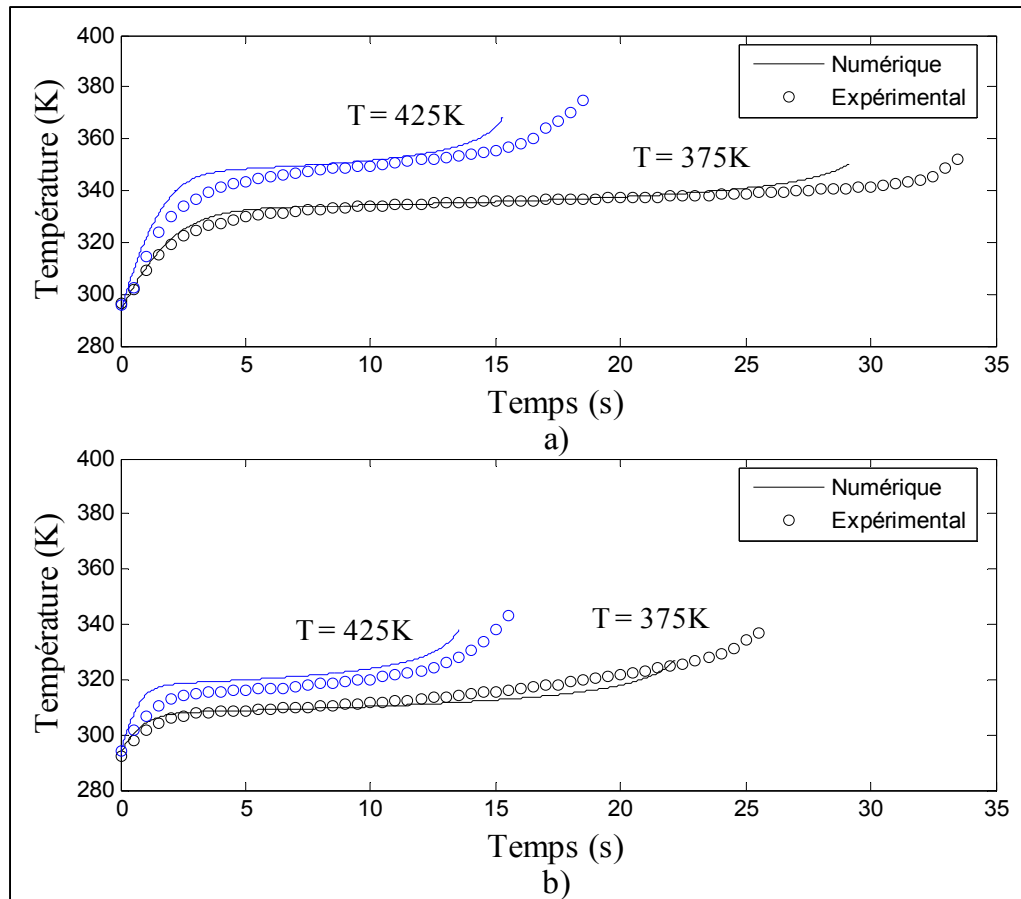
Finalement, le modèle analytique doit être en mesure de calculer le transfert de chaleur provenant de la conduction thermique des fils de thermocouples. Pour ce faire, une corrélation développée par Walton (2004) doit être incorporée au modèle. Dans le cas utilisé ici, le diamètre du thermocouple est de 0,01 pouce. L'équation 3.16 présente cette corrélation.

$$Q_{cond} = \frac{\pi \cdot d_{tc}^2}{4} \sqrt{\frac{4 k_{carb} h_{chal,tc}}{d_{tc}}} (T_{amb} - T_g) \quad (3.16)$$

À l'équation 3.16, la valeur de d_{tc} correspond au diamètre du thermocouple et le terme $h_{chal,tc}$, le coefficient de transfert de chaleur calculé pour le thermocouple. Parmi les autres points importants du modèle, il faut mentionner que les propriétés physiques des carburants varient avec la température de la goutte. Les corrélations utilisées pour le calcul des propriétés physiques telle la diffusivité du carburant dans l'air, la chaleur spécifique, la masse volumique et la conductivité thermique ont été prises dans Yaws (2003). Les propriétés physiques de l'air sont calculées à une température intermédiaire qui correspond à la moyenne de la température ambiante et la température actuelle de la gouttelette et elles sont

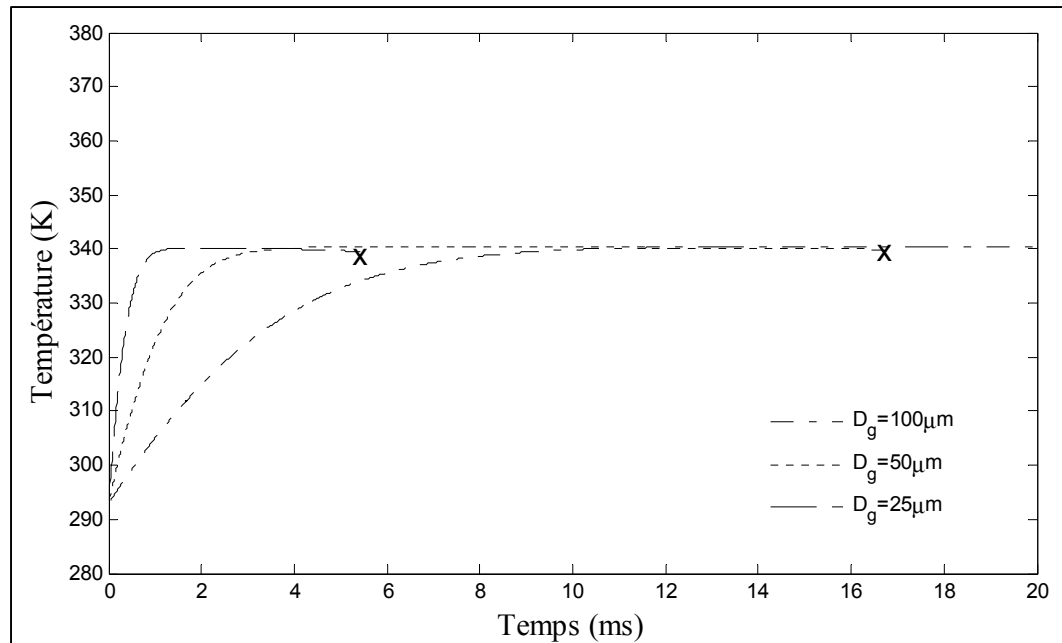
tirées des tables de propriétés physiques du Incropera *et al.* (2007). Ainsi le modèle, créé à l'aide de Matlab, calcule de façon itérative les équations présentées préalablement, pour des intervalles de temps (dt) définis par l'utilisateur. Typiquement un intervalle de temps se situant entre 0,001s et 0,01s est employé. Cependant, un exercice de convergence (résultats présentés à l'ANNEXE V) a démontré qu'un pas de temps (dt) correspondant à 0,01s suffit amplement pour cette simulation dont le code est présenté à l'ANNEXE IV pour des fins de consultations. Le Graphique 3.8 présente le résultat de la simulation de l'évaporation de gouttelettes de butanol et d'éthanol à deux températures ambiantes et dans un écoulement d'air à 1m/s à pression atmosphérique.

Au Graphique 3.8, on remarque que les courbes reproduisent assez bien les résultats expérimentaux obtenus de Seers *et al.* (2010). Il faut comprendre que le modèle analytique est une version simplifiée d'une problématique très complexe. De plus, un coefficient de variation de l'ordre de 10,8% sur la masse initiale des gouttelettes est en partie responsable de l'écart observé au Graphique 3.8. En effet, ceci cause une variation au niveau de la durée de vie des gouttelettes ($\pm 2,9$ s pour le butanol à 375K). Cependant, vu la qualité des résultats présentés, il peut être conclu, avec confiance, que ce modèle représente bien les mécanismes présents, du moins de façon qualitative, et ce, dans un contexte d'évaporation de gouttelettes individuelles. D'ailleurs les plateaux de température d'équilibre apparaissent clairement. De plus, une augmentation subséquente de la température peut être remarquée vers la fin de l'évaporation. Ceci est attribuable à la part de chaleur provenant du fils de support de la gouttelette. En effet, un flux constant de chaleur par conduction pénètre la gouttelette pendant qu'elle s'évapore. Ainsi la portion de conduction devient de plus en plus importante par rapport à la convection, tellement que le flux de chaleur évaporatif ne peut plus évacuer l'excédent de chaleur et ultimement la température interne de la gouttelette se met à augmenter de nouveau. Théoriquement, ce phénomène n'apparaît pas lorsqu'une gouttelette s'évapore par convection uniquement.



Graphique 3.8 Comparaison théorique et expérimentale de la température interne de gouttelettes individuelles de carburant : a) Butanol b) Éthanol

Maintenant, il est possible d'utiliser ce modèle sans l'apport d'énergie du thermocouple afin de tenter de mieux comprendre comment une gouttelette s'évapore dans un milieu pressurisé. Afin de voir de quelle façon la température d'équilibre évolue dans un milieu ambiant à 400K, le butanol est simulé à l'aide du modèle analytique pour plusieurs diamètres. Cette fois, des conditions de test plus représentatives du jet sont simulées. En effet, des gouttelettes de diamètre correspondant à 100%, 50% et 25% du diamètre du trou de l'injecteur, soit 100 μ m, 50 μ m et 25 μ m, sont utilisées. La vitesse d'écoulement est de 25m/s et la pression ambiante est fixée à 5atm. Ces courbes sont présentées au Graphique 3.9.

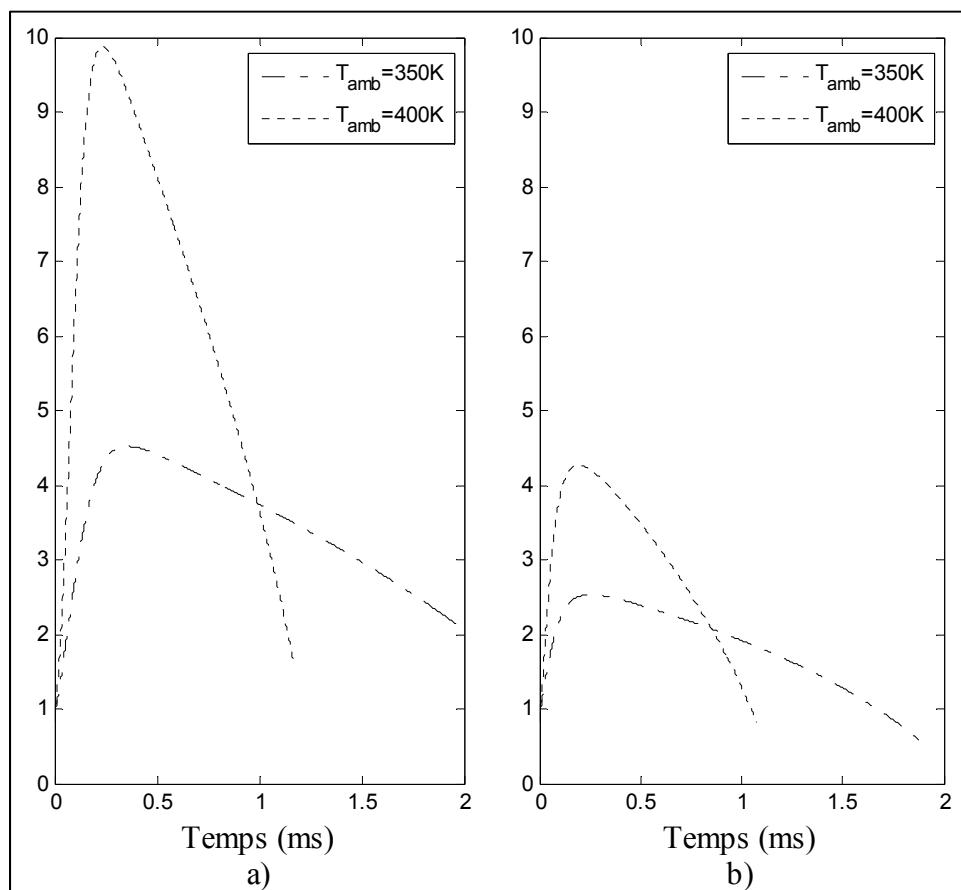


Graphique 3.9 Température interne d'une gouttelette de butanol pour différents diamètres

Au Graphique 3.9, on remarque, tout d'abord, que la température à l'équilibre de la gouttelette ne dépend pas de son diamètre, mais uniquement du carburant et de la température ambiante comme le mentionnent Borman et Ragland (1998). Ainsi, l'hypothèse que seule la période transitoire est affectée par le diamètre de la gouttelette peut être émise.

À présent, pour tenter de faire le lien avec le Graphique 3.7, le modèle sera utilisé pour comparer le comportement évaporatif du butanol et de l'éthanol à des conditions représentatives de celles du Graphique 3.7. Ce qui paraît le plus flagrant, au Graphique 3.7, c'est que l'éthanol semble considérablement moins affecté par une élévation de la température ambiante que le butanol. Ainsi, il est possible de tracer l'évolution du taux d'évaporation massique des deux carburants à différentes températures. Ici, le plus important est de comparer, pour les deux carburants, le rapport du taux d'évaporation massique aux conditions du Graphique 3.7 à celui à 300K. Ainsi, le Graphique 3.10 présente les taux d'évaporation massique, adimensionnalisés par celui à 300K et illustre l'effet de la température ambiante sur l'augmentation du taux d'évaporation par rapport au taux à 300K. Le diamètre de la gouttelette est fixé à $25 \mu m$ et les conditions ambiantes sont les mêmes que

celles du Graphique 3.7, c'est-à-dire, une pression ambiante de 5atm et une vitesse initiale de 25m/s.



Graphique 3.10 Taux d'évaporation massique à différentes températures adimensionnalisés par celui à 300K : a) Butanol b) Éthanol

Le Graphique 3.10 montre que le butanol semble être considérablement plus sensible à une augmentation de la température ambiante que l'éthanol. En effet, une élévation de 100K de la température ambiante engendre un accroissement de presque dix fois le taux d'évaporation massique maximal du butanol comparé à légèrement au-dessus de quatre fois pour l'éthanol. Ainsi, on peut faire l'hypothèse que la haute valeur d'enthalpie de vaporisation de l'éthanol rend ce carburant plus difficile à évaporer. Ainsi, le modèle analytique, avec ses limitations, permet de faire le lien avec le Graphique 3.7. En effet, on remarque que l'éthanol n'a pas une différence aussi marquée, au niveau de la pénétration, que le butanol. Ainsi, on peut faire la supposition qu'en termes de mécanismes dominants, la pénétration du butanol est

principalement gouvernée par des mécanismes évaporatifs, tandis que l'éthanol l'est probablement moins. En effet, pour l'éthanol, la valeur de h_{fg} est si grande qu'il peut en être déduit qu'elle nuit fortement aux mécanismes d'évaporation. Étant donné que ces mécanismes ne semblent pas être dominants, il est possible que d'autres mécanismes, tels que les forces aérodynamiques, aient une plus grande marge de manœuvre pour influencer le jet. Ceci semble expliquer pourquoi une variation au niveau de la pente du régime linéaire est observée sur la courbe de l'éthanol, au Graphique 3.7. En effet, dans un environnement chauffé à pression constante, une diminution de la masse volumique peut entraîner, comme il a été vu à la section 3.3, une augmentation de la vitesse initiale du jet qui se traduit par une augmentation de la pente du régime linéaire des courbes de pénétration. De façon réelle, une augmentation de 300K à 400K de la température de l'air se traduit par une diminution de 33% de la masse volumique. Pour le cas du butanol, au Graphique 3.7, une diminution de la pénétration pour une température à la hausse, combinée à une pente stable pour le régime linéaire, peut être expliquée par une forte prédominance des mécanismes d'évaporation. En effet, la valeur d'enthalpie de vaporisation du butanol ne semble pas nuire suffisamment aux mécanismes d'évaporation pour que les forces aérodynamiques prennent le dessus, comme dans le cas de l'éthanol.

Finalement, selon Vanderwege et Hochgreb (1998), une augmentation de la température ambiante peut affecter suffisamment les propriétés physiques des carburants pour que la valeur de la taille moyenne des gouttelettes soit affectée à la baisse. Ce dernier prend l'exemple de l'iso-octane et propose qu'une augmentation de la température ambiante de 303K à 363K se traduise par une diminution de 20% de la taille moyenne de gouttelette. Il a été vu, à la section 3.3 que la décélération des gouttelettes est inversement proportionnelle à leurs diamètres, c'est-à-dire que plus les gouttelettes sont petites, plus ils auront tendance à ralentir et ainsi elles pénétreraient moins. Ceci appuie donc l'hypothèse d'une diminution de la pénétration pour une augmentation de la température ambiante.

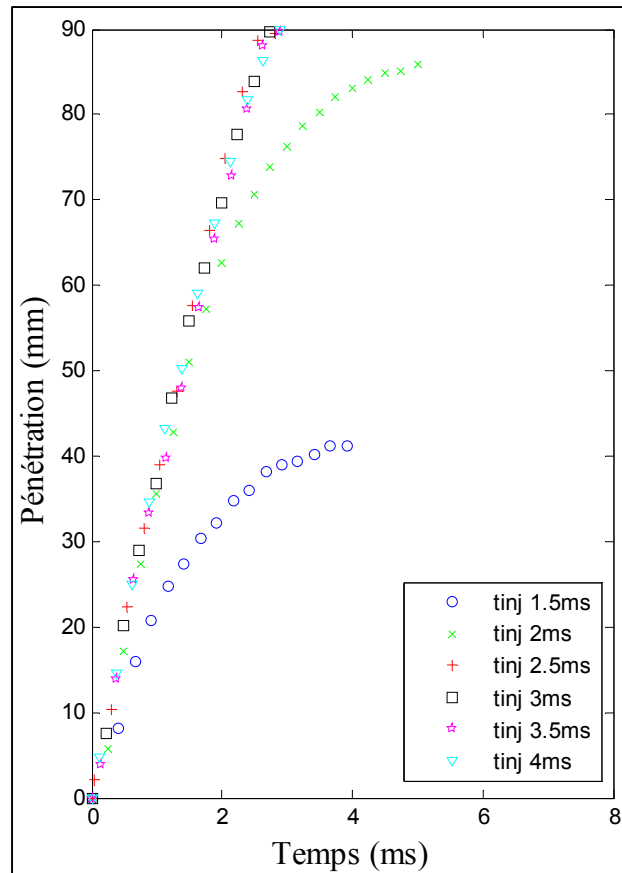
Cette section permet de réaliser qu'une augmentation de la température ambiante change considérablement la dynamique des gouttelettes individuelles. Un modèle analytique a été

utilisé dans le but d'interpréter des tendances observées dans un jet. Quoique ce modèle ne prenne pas en compte les phénomènes complexes impliqués dans un jet de carburant, il permet, tout de même, d'apporter une explication plausible aux tendances observées au Graphique 3.7. En effet, les propriétés physiques des carburants, fortement influencées par la température ambiante, viennent modifier les mécanismes d'évaporation du jet ce qui se traduit par une altération des courbes de pénétration. Ainsi, cette section démontre, encore une fois, l'importance de bien comprendre le poids relatif des propriétés physiques des carburants, ce qui répond au deuxième sous-objectif énoncé à la section 1.4.

3.6 Influence de la durée d'injection

Parmi tous les facteurs traités jusqu'à présent, le seul n'ayant pas été abordé est la durée d'injection. En effet, il est possible de se questionner quant à l'effet d'une durée d'injection plus ou moins longue. Il a été vu auparavant comment différentes variables se reflétaient sur les courbes de pénétration de jet. Maintenant, il devient intéressant de voir comment la pénétration du jet sera affectée si seulement la durée d'injection est variée. Dans un premier temps, tous les essais ont été faits aux conditions standards, c'est-à-dire, $P_{inj} = 8\text{MPa}$, $P_{amb} = 5\text{atm}$ et $T_{amb} = 300\text{K}$. Or, à ces conditions, les courbes de pénétration pour un temps d'injection supérieure ou égale à 2,5ms ne donnent pas d'information sur le régime décroissant. Nonobstant, le Graphique 3.11 présente la pénétration d'un jet d'iso-octane pour des temps d'injection allant de 1,5ms à 4ms.

Il est possible de voir comment les courbes au-delà d'une durée d'injection de 2ms ne donnent pas d'information quant au régime décroissant. Cependant, le Graphique 3.11 démontre que la durée d'injection n'a pas d'effet sur la pente du régime linéaire. En effet, le fait que toutes les courbes soient superposées suggère une vitesse initiale de sortie uniforme pour tous les cas. La figure illustre également la très bonne répétabilité de l'injecteur pour le régime linéaire.

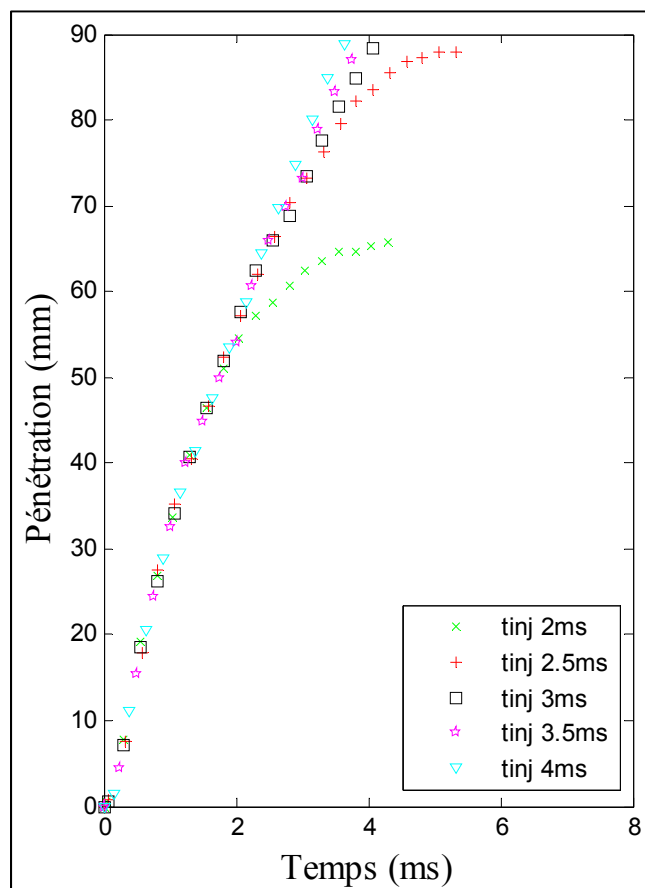


Graphique 3.11 Pénétration du jet en fonction de la durée d'injection : cas de pression ambiante faible

D'ailleurs, le Graphique 3.11 laisse croire que la durée du régime linéaire est fortement dépendante non seulement des conditions ambiantes, comme il l'a été démontré précédemment, mais aussi de la durée d'injection. Ainsi, le flux de quantité de mouvement demeure constant tant que l'injecteur est en configuration ouverte. Lorsque l'injecteur se ferme, le front du jet n'étant plus aidé par la pression d'injection freine davantage en raison des forces aérodynamiques. Par contre, la durée d'injection doit être perçue comme la valeur nominale du temps correspondant au début de la décadence du jet et les conditions ambiantes comme étant un facteur corrigeant, à la hausse ou à la baisse, la valeur de ce temps.

Avec les connaissances acquises de façon expérimentale, il a été vu qu'en augmentant la pression ambiante et en diminuant la pression d'injection il serait possible de réduire la pénétration du jet. C'est ainsi que, dans le but de voir le prolongement de la courbe pour un

temps d'injection de 2,5ms, des tests supplémentaires ont été faits avec l'iso-octane à une pression d'injection de 7MPa et une pression ambiante de 10atm. Les résultats de ces tests supplémentaires sont présentés au Graphique 3.12. En effet, il devient, à présent, possible de voir apparaître la courbe entière de la condition de test $t = 2.5$ ms. Ceci confirme la tendance observée au Graphique 3.11 comme quoi la pente des courbes de pénétration est, d'aucune façon, influencée par la durée d'injection.



Graphique 3.12 Pénétration du jet en fonction de la durée d'injection : cas de pression ambiante de 10atm et pression d'injection de 7MPa

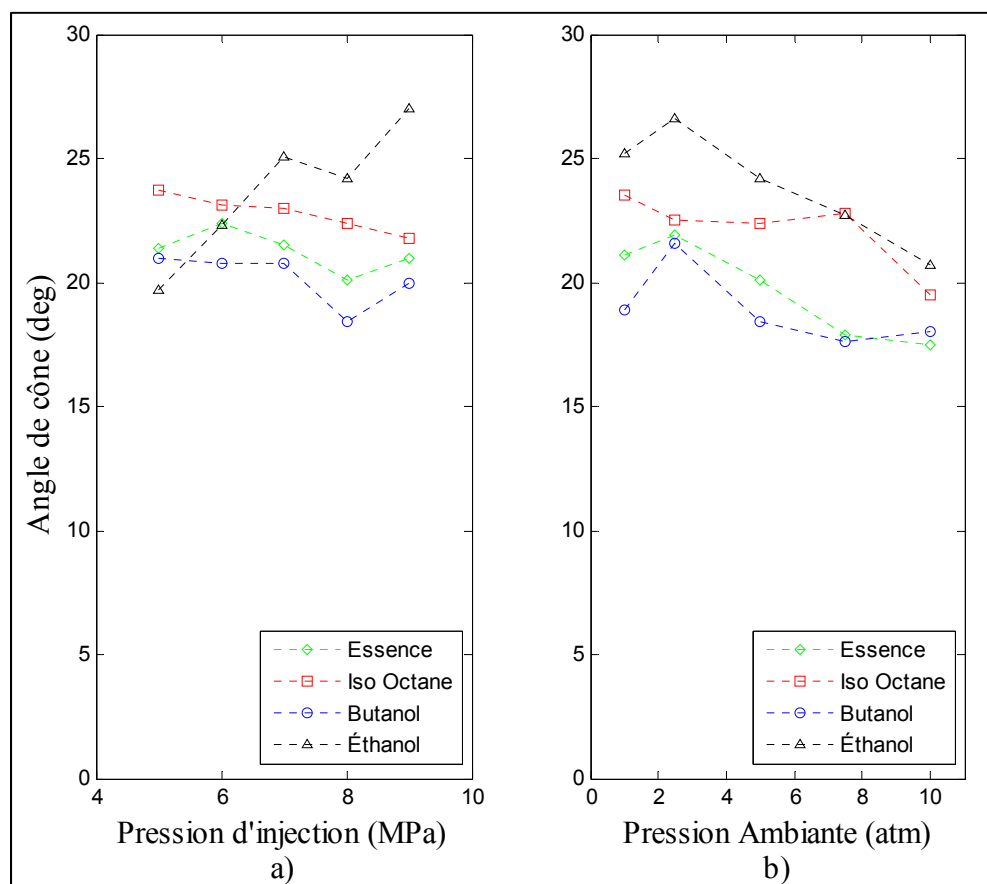
Le Graphique 3.12 illustre bien que la transition entre les deux régimes se fait aux alentours du temps correspondant à la fermeture de l'injecteur. La valeur de ce temps de transition sera abordée plus en profondeur dans un chapitre subséquent où le modèle analytique de prédiction de la pénétration du jet sera présenté. En effet, ce modèle analytique, qui fait partie d'un des trois sous-objectifs de ce travail, permettra d'identifier les paramètres critiques responsables de la transition entre les deux régimes. Finalement, il peut être conclu que la durée d'injection n'influence pas les courbes de pénétration d'autres façons que par une variation du point de transition entre les deux régimes observés.

3.7 Impact sur l'angle de cône

Le dernier élément à avoir été analysé est l'angle de cône des jets lors de diverses injections. Quoique traité que sommairement, il est quand même intéressant de voir quelle influence les différents paramètres à l'étude ont sur l'angle de cône. Pour ce faire, le Graphique 3.13 présente deux graphiques qui illustrent respectivement l'influence de la pression d'injection et l'influence de la pression ambiante. Il sera vu que les propriétés physiques ont une influence sur la valeur de l'angle de cône, ce qui permet de répondre en partie au deuxième sous-objectif tel que présenté à la section 1.4.

Le Graphique 3.13 présente d'abord en a), l'effet qu'a la pression d'injection sur l'angle de cône pour quatre carburants. Mis à part l'éthanol, qui représente un cas plus douteux, les points semblent tous être plutôt constants et il n'a pas de tendances apparentes. Ceci suggère que la pression d'injection a peu d'influence sur l'angle de cône d'un jet de carburant. Par la suite, le graphique b), semble illustrer une légère tendance inverse, c'est-à-dire lorsque la pression ambiante augmente, l'angle de cône diminue. Jusqu'à présent, le chapitre 3 a démontré que la pression ambiante est le paramètre qui a le plus d'influence sur les courbes de pénétration et donc, sur le jet. Ainsi, il s'avère plausible que, tout comme la pénétration totale, un milieu plus dense restreigne aussi le déplacement radial, et donc l'angle de cône, du jet.

Dans la littérature, Delacourt *et al.* (2005) obtiennent des résultats similaires en ce qui a trait à la pression d'injection et ceci confirme que l'angle de cône n'est pas considérablement influencé par la pression d'injection.



Graphique 3.13 Angle de cône pour quatre carburants en fonction de la pression d'injection (a) et de la pression ambiante (b)

En ce qui concerne la pression ambiante, Delacourt *et al.* (2005) obtiennent, cependant, une tendance contraire à celle observée au Graphique 3.13. Par contre, ils précisent que leurs résultats sont contraires à d'autres ouvrages trouvés dans la littérature. Ainsi, Aleiferis *et al.* (2010) présentent des résultats expérimentaux qui viennent appuyer ceux du Graphique 3.13 quant à l'effet de la pression ambiante. En effet, ils trouvent qu'une augmentation de la pression de 0,5atm à 1atm produit une réduction appréciable de l'angle de cône et ce, à une température de 393K. De plus, les travaux de Pielecha *et al.* (2010) indiquent que, pour la même augmentation de pression ambiante, ils observent une diminution de 25% de la largeur

du jet, qui peut être traduit par une réduction de l'angle de cône puisque leurs données sont prises à la même distance axiale. Ils indiquent, d'ailleurs, que des variations importantes de la distribution radiale d'un jet sont observées ce qui expliquent, en partie, le comportement, parfois erratique, des données du Graphique 3.13.

On retrouve, au Graphique 3.13, une tendance très notable au niveau de l'angle de cône pour des conditions fixes. En effet, de façon quasi systématique, l'éthanol possède l'angle de cône le plus grand, suivi de l'iso-octane, de l'essence et du butanol. Ainsi, seules les propriétés physiques des carburants peuvent être responsables d'une telle variation de l'angle de cône. Dans les travaux de Gao *et al.* (2007), ceux-ci présente l'angle de cône pour l'éthanol, l'essence et des mélanges, en différentes proportions, de ces deux derniers. Leurs résultats démontrent que, toutes conditions demeurant inchangées, l'ajout graduel d'éthanol à l'essence a comme effet d'augmenter l'angle cône. Ceci est en ligne avec les résultats du Graphique 3.13. Ainsi, même si l'angle de cône ne sera pas traité de manière approfondie, il est intéressant de voir de quelles façons celui-ci est affecté par les différents paramètres tels que la pression d'injection, la pression ambiante et les carburants. Ceci aide à répondre aux deux premiers sous-objectifs énoncés à la section 1.4.

3.8 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, l'analyse des données a été faite en tentant d'identifier les principaux mécanismes qui gouvernent la pénétration de carburants. Ceci répond aux deux premiers sous-objectifs présentés à la section 1.4, c'est-à-dire de caractériser les mécanismes prédominants lié à l'environnement d'injection et de déterminer de quelles façons les propriétés physiques des carburants affectent les courbes de pénétration. Ensuite, deux régimes ont été identifiés. Tout d'abord le régime linéaire qui existe lorsque l'injecteur est ouvert. Puis, le régime décroissant qui apparaît aux alentours du temps de fermeture de l'injecteur. Il a été vu que les conditions ambiantes influencent fortement les courbes de pénétration du jet. La pression ambiante, qui est directement liée à la masse volumique, semble la plus importante, car elle affecte à la fois la pente du régime linéaire ainsi que la

pénétration totale du jet. La pression d'injection aussi est un paramètre très important. Son impact est plutôt au niveau de la vitesse initiale du jet, ce qui a d'importantes répercussions sur les mécanismes de fragmentation et, ultimement, sur le SMD du jet. Finalement, la température ambiante a le potentiel d'influencer grandement les courbes de pénétration puisqu'elle fait intervenir les mécanismes évaporatifs ainsi que ceux liés à une réduction de la masse volumique. Il a été vu que les propriétés physiques des carburants dicteront l'importance relative des mécanismes évaporatifs.

En somme, plusieurs mécanismes influencent la structure et la pénétration du jet alors que les propriétés physiques des carburants sont importantes et ont définitivement le potentiel d'influencer les courbes de pénétration. Le prochain chapitre portera sur le développement des corrélations qui seront utilisées pour bâtir le modèle empirique de prédiction de pénétration du jet basé sur les propriétés des carburants.

CHAPITRE 4

DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE EMPIRIQUE

4.1 Introduction

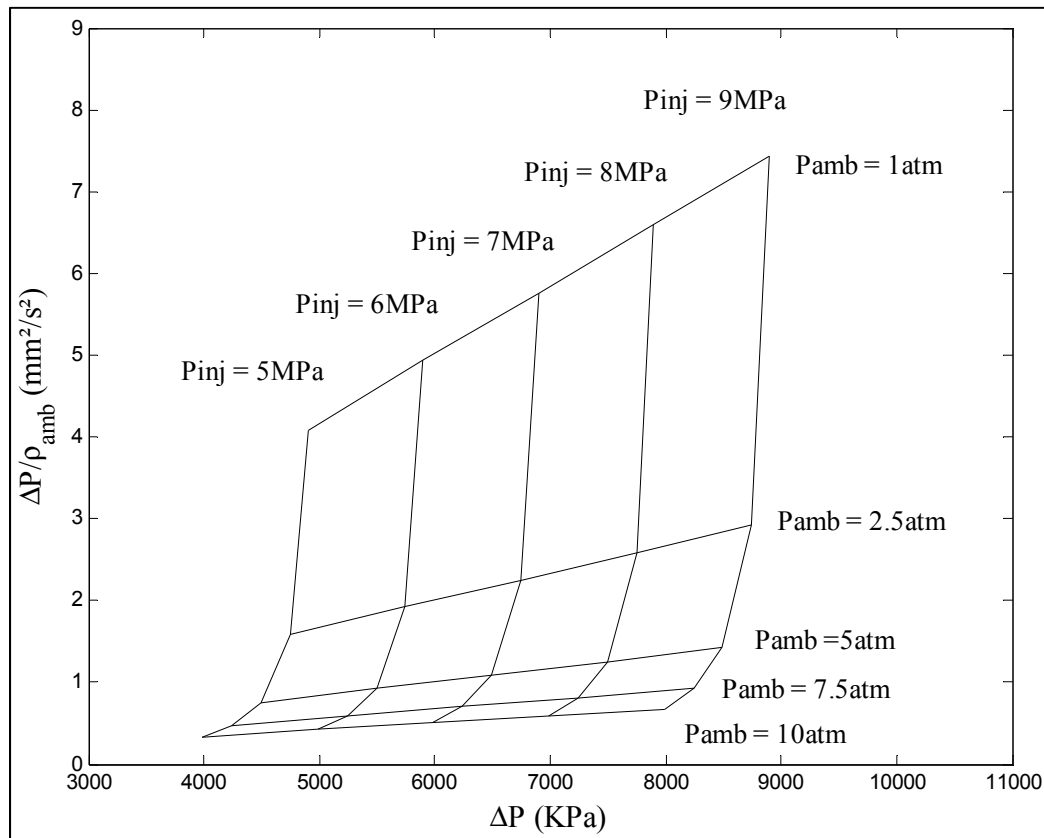
Au chapitre 3, l'ensemble des résultats expérimentaux a été présenté et décortiqué. Successivement, l'influence sur la pénétration du jet de chacun des paramètres à l'étude a été analysée. Ces paramètres sont : les différents carburants, la pression d'injection, la pression ambiante, la température ambiante et la durée d'injection. Le but visé de cette section est de développer un modèle empirique général basé sur plusieurs corrélations qui prendront en compte les paramètres clés, analysés au chapitre précédent. Pour des fins de simplicités, le modèle empirique sera aussi référé comme étant le ME ou, simplement le modèle. Le développement du ME répondra au troisième sous-objectif en permettant d'apprécier l'importance relative de chacun des paramètres à l'étude. À cet effet, des essais expérimentaux ont d'ailleurs été réalisés avec des mélanges de carburants. Ces mélanges sont le B50-iso (50% vol. butanol et 50% vol. iso-octane) et le E50-iso (50% vol éthanol et 50% vol. iso-octane). Le chapitre 3 a permis d'identifier les mécanismes clés et ceci facilitera grandement la construction du ME.

Tout d'abord, il a été vu que les courbes de pénétration pouvaient être divisées en deux parties, soit le régime linéaire et le régime décroissant. Conséquemment, le ME se devra de l'être aussi. De plus, le modèle devra contenir, de façon directe ou indirecte, chacun des paramètres étudiés de façon expérimentale. Les pages subséquentes présenteront l'ensemble des étapes réalisées dans l'élaboration du ME.

4.2 Définition des paramètres critiques du ME

Dans cette section, les paramètres les plus importants seront présentés. Le choix de ces paramètres sera basé, en premier lieu, sur les observations effectuées au chapitre précédent et

aussi sur les travaux réalisés par d'autres chercheurs. De plus, la ou les corrélations devront s'exprimer en fonction des variables utilisées au cours des essais expérimentaux et des propriétés des carburants. Parmi les paramètres étudiés préalablement, il y a le différentiel de pression (ΔP) entre la pression d'injection du carburant et la pression du milieu dans lequel l'injection a lieu. Ce terme est probablement un des plus importants. Cependant, les courbes expérimentales démontrent que ce terme semble être pondéré par une autre variable. Effectivement, en comparant le Graphique 3.2 (influence de la pression d'injection) et le Graphique 3.4 (influence de la pression ambiante), il est possible de voir que les courbes de pénétration sont beaucoup plus influencées par le ΔP lorsque celui-ci est varié par la pression ambiante. Dans la littérature, le terme ΔP est couramment pondéré par la masse volumique du milieu ambiant, ρ_{amb} (Borman et Ragland (1998), Kostas *et al.* (2009)) Afin d'illustrer la sensibilité du terme $\Delta P/\rho_{amb}$, le Graphique 4.1 présente ses valeurs pour les plages de ΔP à l'étude.



Graphique 4.1 Sensibilité du terme $\Delta P/\rho_{amb}$ pour différentes combinaisons de ΔP

Le Graphique 4.1 présente la variation du terme $\Delta P/\rho_{amb}$ le long des lignes de pression constante (pression d'injection ou pression ambiante) auxquelles les intersections correspondent à une valeur de ΔP . Les lignes horizontales correspondent à des variations de la pression d'injection pour des pressions ambiantes fixes, tandis que les lignes verticales correspondent à des variations de la pression ambiantes pour des pressions d'injection fixes. L'avantage d'utiliser $\Delta P/\rho_{amb}$ est qu'il prend en considération, à la fois, l'effet de la pression d'injection et les effets de la pression et la température ambiante.

Dans la littérature, la corrélation pour les courbes de pénétration est couramment présentée comme à l'équation 4.1 (Kostas *et al.* (2009), Hiroyasu *et al.* (1980), Borman et Ragland(1998)). Puisque les corrélations sont toujours développées pour un carburant unique, la valeur de la constante (K_{carb}) est donnée de façon explicite. L'intérêt de ce travail est aussi de développer une formulation qui donne la valeur de cette constante en fonction des propriétés physiques des carburants. Cela dit, l'équation 4.1 se trouve à être sous la forme la plus générale.

$$S(t) = K_{carb} \left[\frac{\Delta P}{\rho_{amb}} \right]^x t^y \left(\frac{T_{amb}}{T_{ref}} \right)^z \quad (4.1)$$

Initialement, le terme correctif pour la température sera mis de côté puisqu'uniquement les essais réalisés à température ambiante seront utilisés. Dans une section subséquente de ce chapitre, sa pertinence ainsi que sa validité seront abordées. À la prochaine section, la valeur de la constante des carburants ainsi que la valeur des exposants seront déterminées pour les deux régimes des courbes de pénétration. Finalement, les essais réalisés avec le B50-iso et le E50-iso seront utilisés afin d'augmenter la confiance dans l'équation proposée.

4.3 Construction des corrélations

D'abord, une corrélation sera développée pour chacun des deux régimes des courbes de pénétration. Dans un premier temps, la valeur des exposants x et y de l'équation 4.1 doit être

déterminée. Pour ce faire, l'équation 4.1 est manipulée de sorte que S/t^y devient fonction de $\Delta P/\rho_{amb}$. Par la suite, pour chaque valeur de $\Delta P/\rho_{amb}$, les valeurs respectives de S/t^y sont tracées (pour tous les carburants et toutes les conditions de tests). Ensuite, l'exposant de la courbe de tendance passant dans le nuage de points du graphique résultant, permet de trouver le lien unissant ces deux paramètres. Ceci sera effectué, en premier lieu, pour le régime linéaire. Par la suite, cette même approche sera utilisée pour le régime décroissant.

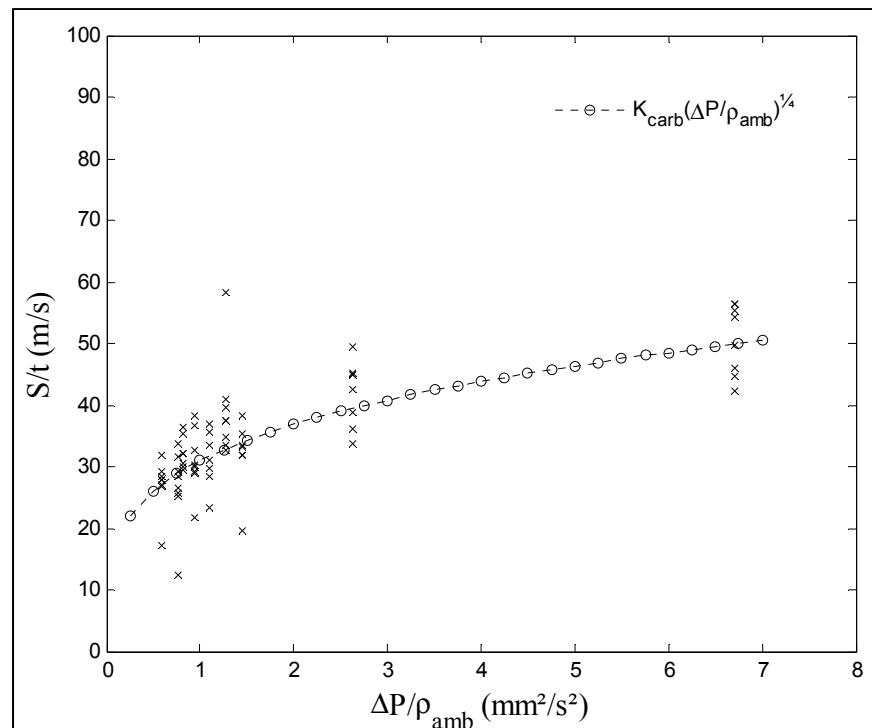
4.3.1 Régime linéaire

Avant tout, il été vu, à la section 3.6, que la transition entre les deux régimes s'effectuait aux alentours du temps correspondant à la durée d'injection. En ce qui a trait aux essais utilisés pour construire le ME, la durée d'injection est de 2ms. Ainsi, uniquement les valeurs de pénétration correspondantes à un temps inférieur à 2ms seront utilisées pour déterminer les exposants du régime linéaire. Le Tableau 4.1 montre, à titre d'exemple, le cas du butanol à une pression ambiante de 5atm et une pression d'injection de 5MPa. Ce cas équivaut à un $\Delta P/\rho_{amb}$ de $0,763\text{mm}^2/\text{s}^2$. Pour le régime linéaire, puisque la pente de la courbe de pénétration du jet en fonction du temps est du premier ordre (linéaire), la valeur de l'exposant du terme de temps (paramètre «y» de l'équation 4.1) a été fixée à 1.

Tableau 4.1 Exemple de calcul
du terme S/t^y

t (ms)	S (mm)	$S/t^y y=1$
0	0,00	0,00
0,187	2,33	12,47
0,437	12,40	28,38
0,687	23,11	33,64
0,937	29,68	31,68
1,187	34,77	29,29
1,437	37,95	26,41
1,687	43,35	25,70
1,937	48,65	25,12

Au Tableau 4.1, seule la valeur de 12,47 semble s'écarter des données qui sont bien groupées. Cette valeur provient du fait que le pointeau de l'injecteur n'est pas encore à sa position complètement ouverte qui, selon le manufacturier, survient à 0,455ms (voir ANNEXE I). Cependant, afin d'être en mesure d'écarter, de façon rationnelle, des données d'apparences douteuses, une méthode statistique présentée dans Ross (2003) est utilisée. Cette méthode consiste à utiliser le critère de Peirce qui est basé sur le nombre de données dans un échantillon, la moyenne et l'écart-type. Par la suite, le calcul des bornes minimale et maximale, par rapport à la moyenne initiale de l'échantillon, permet de rejeter les valeurs se trouvant en dehors de ces limites. La procédure d'utilisation du critère de Peirce peut être consultée à l'ANNEXE VIII. En utilisant le critère de Peirce, il devient possible d'éliminer la valeur de 12,47. À présent, l'étape présentée à l'exemple du Tableau 4.1 est réalisée pour l'ensemble des valeurs de $\Delta P/\rho_{amb}$ (neuf au total). Il est à noter qu'uniquement les données du butanol pour différents ΔP sont utilisées pour réaliser le Graphique 4.2 puisque la valeur de l'exposant n'est pas liée aux propriétés physiques, mais bien aux conditions d'injection.



Graphique 4.2 Courbes de tendance pour déterminer l'exposant du terme $\Delta P/\rho_{amb}$ du régime linéaire pour le butanol

Le Graphique 4.2 permet de trouver la valeur de l'exposant grâce à une courbe de tendance exponentielle. Cette valeur est de 0,25 pour qu'elle passe au centre du nuage de point et minimise le R^2 . Cependant, il existe, tout de même, une marge de manœuvre au niveau de son amplitude. Ici, l'amplitude est contrôlée par le terme K_{carb} , propre à un carburant et donc, à ses propriétés physiques. À présent, connaissant l'allure de l'équation de pénétration du jet pour le régime linéaire, il est possible de déterminer les valeurs expérimentales des constantes d'amplitudes des différents carburants. Pour trouver ces valeurs, l'équation 4.1 est manipulée de nouveau afin d'obtenir une nouvelle équation permettant ainsi de trouver de K_{carb} . Cette équation est présentée ci-dessous, à l'équation 4.2.

$$K_{carb} \left[\frac{mm^{1/2}}{s^{1/2}} \right] = \frac{S}{\left[\frac{\Delta P}{\rho_{amb}} \right]^{1/4} t} \quad (4.2)$$

En reprenant sensiblement la même méthode que présentée précédemment, il est possible de calculer la valeur expérimentale de la constante d'amplitude de tous les carburants pour le régime linéaire. Un exemple de calcul basé sur le butanol est présenté au Tableau 4.2.

Tableau 4.2 Exemple du calcul, basé sur le butanol, de la constante d'amplitude des carburants

t (ms)	S (mm)	$(\Delta P/\rho_{amb})^{1/4}$	K_{carb}
0,0	0,0	0,0	0,0
0,187	2,33	0,93	13,3
0,437	12,40	0,93	30,4
0,687	23,11	0,93	36,0
0,937	29,68	0,93	33,9
1,187	34,77	0,93	31,3
1,437	37,95	0,93	28,2
1,687	43,35	0,93	27,5
1,937	48,65	0,93	26,9

Le Tableau 4.2 présente le cas du butanol à une pression d'injection de 5MPa et une pression ambiante de 5atm. Cet exercice est fait, par la suite, pour toutes les combinaisons possibles de $\Delta P/\rho_{amb}$ et ce, pour chacun des six carburants. Comme le Tableau 4.2 le démontre, il existe une certaine variabilité des résultats. En effet, de façon systématique, la première valeur se démarque des autres. Ceci est attribuable au fait que l'injecteur se trouve, à cet instant, toujours en régime transitoire d'ouverture d'aiguille, puisque cette phase dure, comme mentionnée précédemment, environ 0,5 ms. Comme il l'a été fait dans l'exemple du Tableau 4.1, le critère de Peirce est utilisé afin d'éliminer les valeurs douteuses. De plus, cette méthode a été utilisée pour filtrer les données, dans un premier temps, pour chacun des cas de $\Delta P/\rho_{amb}$, puis par la suite, pour la moyenne globale pour chacun des carburants. Ainsi, la valeur de chacune des constantes d'amplitude des carburants a été déterminée pour le régime linéaire. Le Tableau 4.3 présente un résumé de ces résultats.

Tableau 4.3 Résumé des valeurs de K_{carb} pour le régime linéaire

Éthanol	$K_{carb, moy}$	29,41
	Écart type	1,33
E50-Iso	$K_{carb, moy}$	30,79
	Écart type	2,02
B50-Iso	$K_{carb, moy}$	30,83
	Écart type	1,48
Essence	$K_{carb, moy}$	31,40
	Écart type	1,85
Butanol	$K_{carb, moy}$	32,37
	Écart type	1,31
Iso-octane	$K_{carb, moy}$	32,82
	Écart type	2,51

Le Tableau 4.3 présente la valeur moyenne de K_{carb} ainsi que la valeur des écarts types pour chacun des carburants. La filtration des données, à l'aide du critère de Peirce, a permis d'obtenir des écarts types relativement faibles. De plus, il peut être remarqué que les valeurs des constantes d'amplitude sont toutes groupées à l'intérieur d'une plage approximative de

10%. Ceci suggère que durant le régime linéaire, le paramètre K_{carb} ne soit pas considérablement influencé par les propriétés physiques des carburants. Ceci vient appuyer les propos de la section 3.2 quant à la non-dépendance des propriétés physiques sur la pente, et donc sur la vitesse initiale, lors du régime linéaire. En résumé à cette sous-section, l'équation 4.3 présente la corrélation pour le régime linéaire avec les valeurs de K_{carb} présentées dans Tableau 4.3.

$$S(t) = K_{carb} \left[\frac{\Delta P}{\rho_{amb}} \right]^{1/4} t \quad (4.3)$$

Maintenant que l'équation du régime linéaire est établie, la démarche réalisée pour déterminer l'équation du régime décroissant sera présentée à la sous-section 4.3.2.

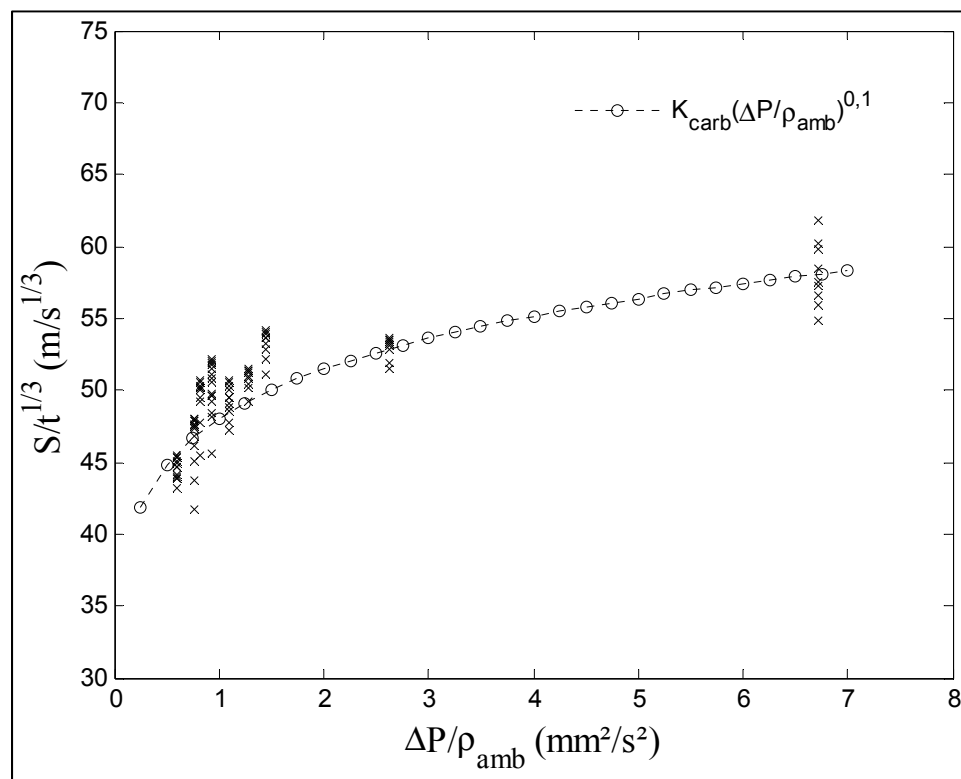
4.3.2 Régime décroissant

L'approche utilisée pour déterminer l'équation de la courbe de pénétration du régime décroissant est pratiquement identique à celle utilisée pour le régime linéaire. Cependant, elle comporte des subtilités et il est donc important de l'aborder de façon détaillée. Dans un premier temps, il a été expliqué, à la section 4.3.1, que la transition entre les deux régimes des courbes de pénétration s'effectue aux alentours du temps correspondant à la durée d'injection. Ceci dit, uniquement les données acquises après 2ms seront utilisées pour cette section.

Afin de déterminer la valeur des exposants x et y de l'équation 4.1 comme à la sous-section 4.3.1, le nuage de points correspondant à la valeur de S/t^y en fonction de $\Delta P/\rho_{amb}$ pour tous les cas doit être tracé. Dans le cas du régime décroissant, la valeur de l'exposant attribué au paramètre temps ne sera pas égale à 1 parce que la pente n'est pas du premier ordre. Puisque pour chaque valeur de $\Delta P/\rho_{amb}$, la valeur de cet exposant contrôle le groupement des données, l'exposant choisi sera celui qui cède, de façon globale, le plus petit groupement pour chaque $\Delta P/\rho_{amb}$. Par essai et erreur, la valeur de 1/3 a été déduite. De plus, cette valeur se compare

aux valeurs typiques retrouvées dans la littérature, c'est-à-dire, de l'ordre de 1/2 (Kostas *et al.* (2009), Desantes *et al.* (2006), Borman et Ragland (1998), Heywood (1988)).

Au Graphique 4.3, les données du butanol sont utilisées afin d'illustrer la courbe de tendance qui passe par le nuage de points. L'exposant de cette courbe de tendance se trouve à être celui du terme $\Delta P/\rho_{\text{amb}}$.



Graphique 4.3 Courbe de tendance pour déterminer l'exposant du terme $\Delta P/\rho_{\text{amb}}$ du régime décroissant pour le butanol

Le Graphique 4.3 montre que l'exposant de la courbe de tendance épousant le mieux le nuage de points prend la valeur de 0,1. En comparant celui du régime linéaire, qui était de 0,25, on remarque que cette valeur est considérablement inférieure. Ceci suggère que le poids relatif du terme $\Delta P/\rho_{\text{amb}}$ est moindre pour le régime décroissant. Il se pourrait donc que les conditions d'injection du carburant influencent principalement le régime linéaire. Ainsi, il sera intéressant de voir à quel point la valeur des constantes d'amplitude des carburants est importante.

Comme il l'a été fait précédemment, la valeur expérimentale des constantes d'amplitude pour le régime décroissant est déterminée à l'aide de l'équation 4.4.

$$K_{carb} \left[\frac{mm^{4/5}}{s^{2/15}} \right] = \frac{S}{\left[\frac{\Delta P}{\rho_{amb}} \right]^{0,1} t^{1/3}} \quad (4.4)$$

De plus, le critère de Peirce, proposé par Ross (2003), sera employé de nouveau. Le Tableau 4.4, ci-dessous, présente le résumé des valeurs de K_{carb} pour le régime décroissant.

Tableau 4.4 Résumé des valeurs de K_{carb} pour le régime décroissant

Éthanol	$K_{carb, moy}$	47,04
	Écart type	1,68
E50-Iso	$K_{carb, moy}$	48,36
	Écart type	2,08
B50-Iso	$K_{carb, moy}$	48,72
	Écart type	1,25
Butanol	$K_{carb, moy}$	49,22
	Écart type	1,55
Essence	$K_{carb, moy}$	51,85
	Écart type	1,21
Iso-octane	$K_{carb, moy}$	52,19
	Écart type	1,74

Les résultats observés au Tableau 4.4 démontrent, encore une fois, un groupement serré. Cependant, cette fois-ci, en comparant ces résultats avec les courbes de pénétration du Graphique 3.1, il est évident que le lien est fort. En effet, les valeurs de K_{carb} pour l'essence et l'iso-octane sont pratiquement identiques et il est de même pour la pénétration totale de ces deux derniers. Ensuite, les valeurs de K_{carb} pour l'éthanol et le butanol sont cohérentes avec leurs courbes de pénétration respectives. Ainsi, la comparaison avec le Graphique 3.1 vient renforcer la validité des résultats présentés au Tableau 4.4 et suggère que, contrairement au régime linéaire, la valeur des constantes d'amplitude des carburants

influence les courbes de pénétration. En somme, l'équation 4.5 présente la corrélation pour le régime décroissant avec les valeurs de K_{carb} pouvant être trouvées au Tableau 4.4.

$$S(t) = K_{carb} \left[\frac{\Delta P}{\rho_{amb}} \right]^{0,1} t^{1/3} \quad (4.5)$$

À présent, en utilisant les valeurs expérimentales des constantes d'amplitude des carburants, un lien sera établi, sous forme d'une corrélation, entre ces résultats et les propriétés physiques clefs des carburants, définie au Tableau 2.1.

4.3.3 Élaboration d'une corrélation pour les constantes d'amplitude

Aux sous-sections 4.3.1 et 4.3.2, les valeurs expérimentales des constantes d'amplitudes des carburants ont été présentées pour les deux régimes, soit le régime linéaire et le régime décroissant. Dans l'optique de développer une corrélation pour la totalité des courbes de pénétration, le lien analytique entre les K_{carb} et les propriétés physiques des carburants doit être défini. Auparavant, il a été vu que les propriétés physiques qui caractérisent le mieux les paramètres macroscopiques tels que la pénétration de jets de carburants sont la masse volumique, la température d'ébullition et l'enthalpie de vaporisation. L'approche utilisée pour développer cette corrélation est basée sur des ratios de propriétés physiques auxquels ont été ajoutés des exposants qui ajustent le poids relatif de ces ratios. En d'autres mots, un des carburants a été choisi comme carburants de référence, puis les autres se comparent à ce dernier. L'équation 4.6, ci-dessous, présente la structure générale de la corrélation qui sera valable pour les deux régimes.

$$\frac{K_{carb,i}}{K_{carb,ref}} = \left[\frac{\rho_{carb,i}}{\rho_{carb,ref}} \right]^\alpha \left[\frac{h_{fg,carb,i}}{h_{fg,carb,ref}} \right]^\beta \left[\frac{T_{ebul,carb,i}}{T_{ebul,carb,ref}} \right]^\gamma \quad (4.6)$$

Dans le cadre de ce projet, le choix du carburant de référence s'est arrêté arbitrairement sur le butanol. Autre point important à mentionner, est le fait que les propriétés physiques des carburants sont fortement dépendantes de leur milieu ambiant, c'est-à-dire de la pression et la température. C'est pour cette raison que les valeurs des propriétés physiques sont toutes aux conditions standards, i.e. 1atm et 298K. Puisque l'équation 4.6 comporte trois inconnues (α , β et γ) et que le butanol est utilisé comme carburant de référence, un total de quatre carburants doit être utilisé pour solutionner cette équation. Pour ce faire, l'iso-octane, l'éthanol et le E50-iso ont été utilisés avec le butanol. À ce stade, l'objectif est de trouver une combinaison d'exposants qui minimiserait l'erreur du système d'équations. Afin d'identifier les meilleurs exposants, un code Matlab a été réalisé. Ce code passe, en boucle et de façon itérative, toutes les possibilités d'exposant d'une borne inférieure à une borne supérieure. Une tolérance est utilisée pour filtrer les résultats qui concèdent une erreur trop élevée. Typiquement, cette tolérance est dans les environs de 2,5% à 3%. Le code Matlab est présenté à l'ANNEXE VI.

Finalement, ci-dessous sont présentées les deux corrélations qui permettent de déterminer la valeur des constantes d'amplitudes pour chacun des carburants. Tout d'abord, l'équation 4.7, pour le régime linéaire, est présentée.

$$K_{carb,i} = K_{carb,ref} \left[\frac{\rho_{carb,i}}{\rho_{carb,ref}} \right]^{1,4} \left[\frac{h_{fg,carb,i}}{h_{fg,carb,ref}} \right]^{-1/4} \left[\frac{T_{ebul,carb,i}}{T_{ebul,carb,ref}} \right]^{-1/5} \quad (4.7)$$

Ici, la valeur du paramètre $K_{carb,ref}$ est de $32,37 \text{mm}^{1/2}/\text{s}^{1/2}$ (voir Tableau 4.3). Ensuite, voici l'équation 4.8 pour le régime décroissant.

$$K_{carb,i} = K_{carb,ref} \left[\frac{\rho_{carb,i}}{\rho_{carb,ref}} \right]^{1,1} \left[\frac{h_{fg,carb,i}}{h_{fg,carb,ref}} \right]^{-1/4} \left[\frac{T_{ebul,carb,i}}{T_{ebul,carb,ref}} \right]^{-1/2} \quad (4.8)$$

À l'équation 4.8, la valeur du paramètre $K_{carb, ref}$ est $49,22\text{mm}^{4/5}/\text{s}^{2/15}$ (voir Tableau 4.4). Les équations 4.7 et 4.8 illustrent bien le poids relatif de chacun des ratios. Dans les deux cas, ce sont les ratios des masses volumiques qui ont le plus d'impact sur la valeur des K_{carb} . En effet, des valeurs de 1,4 pour le régime linéaire et de 1,1 pour le régime décroissant illustrent l'importance de la quantité de mouvement du jet. Ensuite, l'exposant du ratio des températures d'ébullition augmente d'une valeur de 0,2 pour le régime linéaire à une valeur de 0,5 pour le régime décroissant. Ceci indique que les mécanismes d'évaporation sont plus importants dans la partie décroissante du jet, car la température des gouttes a augmenté ce qui entraîne une évaporation accrue.

Étant donné que quatre des six carburants ont été utilisés pour déterminer les exposants, les deux carburants restants sont utilisés pour valider les corrélations. Ces deux carburants sont le B50-iso et l'essence. Ils ont en commun le fait qu'ils sont tous deux des mélanges. Tout d'abord, pour le B50-iso, la masse volumique a été déterminée en faisant la moyenne des masses volumiques du butanol et de l'iso-octane. L'enthalpie de vaporisation a été déterminée en faisant une moyenne pondérée par la masse puisque le mélange été fait à part volumique égale et non massique. Finalement, la température d'ébullition a été déterminée en faisant la moyenne des deux températures d'ébullition. Il est à noter que les propriétés physiques du E50-iso ont été, au préalable, déterminées exactement de la même façon. Ce sont, d'ailleurs, ces propriétés qui sont présentées au Tableau 2.1. Ensuite, pour l'essence, puisque ce carburant est un mélange complexe de plusieurs différents composés, les propriétés physiques sont pratiquement toujours données sous la forme d'une plage. Pour la masse volumique ainsi que pour l'enthalpie de vaporisation, les valeurs utilisées s'avèrent à être une moyenne entre les valeurs supérieure et inférieure de ces plages qui proviennent de Heywood (1988). Toutefois, pour la température d'ébullition, la valeur de T50 tirée de Bruno *et al.* (2009), a été utilisée. Le Tableau 4.5 présente les valeurs calculées à l'aide des corrélations, ainsi que les valeurs obtenues à l'aide des données expérimentales qui peuvent être retrouvées aux Tableau 4.3 et Tableau 4.4. De plus, l'écart entre les valeurs expérimentales et les valeurs obtenues à l'aide des corrélations sont aussi présentées.

Tableau 4.5 Valeurs de la corrélation et valeur expérimentales de K_{carb}

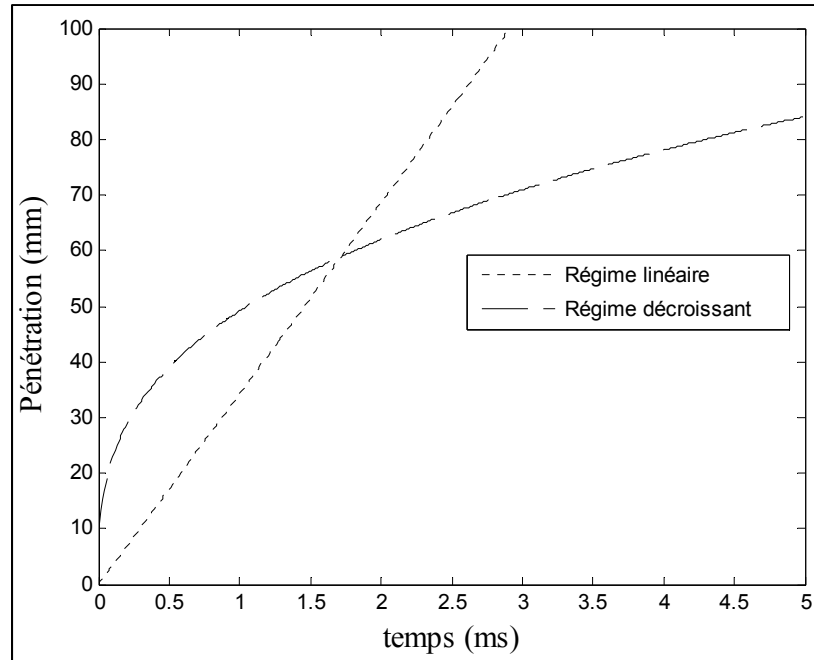
	Régime	$K_{carb,corr}$	$K_{carb,exp}$	Écart (%)
B50-iso	Linéaire	31,8	30,8	3,1
	Décroissant	49,6	48,7	1,7
Essence	Linéaire	33,3	31,4	5,7
	Décroissant	50,7	51,9	-2,2

Le Tableau 4.5 illustre que les résultats obtenus à partir de la corrélation représentent bien les résultats obtenus de façon expérimentale. Ensuite, on remarque que l'écart le plus important est inférieur 6% et ce, pour l'essence en régime linéaire. Cependant, cette valeur entre dans la plage couverte par l'écart type de cette valeur comme on le remarque au Tableau 4.3.

Maintenant que les corrélations servant à déterminer les constantes d'amplitude des carburants pour les deux régimes des jets ont été déterminées, la section 4.4 discutera de la transition entre les deux régimes et de la signification de ce point

4.4 Transition entre les régimes linéaire et décroissant

Dans la section 4.3, les corrélations pour les courbes de pénétration ont été établies pour les deux régimes des jets de carburants. Au chapitre 3, il a été vu que durant le premier régime, les forces liées à la quantité de mouvement sont dominantes, ce qui entraîne un comportement linéaire de la pénétration du jet. Ensuite, durant le régime décroissant, ce sont les forces aérodynamiques qui sont dominantes, ce qui se solde par une diminution progressive de la vitesse du jet et donc en une courbe de pénétration décroissante. Ceci dit, l'intersection de ces deux courbes correspondrait donc au moment de transition entre les mécanismes gouvernés par les forces de quantité de mouvement et ceux gouvernés par les forces aérodynamiques. À titre indicatif, le Graphique 4.4 présente un exemple qui fait apparaître la totalité des deux courbes décrite par chacune des corrélations pour le butanol.



Graphique 4.4 Exemple des courbes de pénétration pour les régimes linéaire et décroissant du butanol à $P_{inj}=8\text{MPa}$ et $P_{amb}=5\text{atm}$

Le Graphique 4.4 illustre bien l'intersection des deux courbes. Ici, l'intersection des deux courbes semble se produire juste après 1,5ms. Le temps auquel les deux courbes se croisent sera nommé t_t , pour temps de transition. On peut aussi remarquer, au Graphique 4.4, une discontinuité évidente à $t = t_t$. Ceci a comme conséquence de générer une zone d'incertitude dans la région immédiate autour de l'intersection des ces deux courbes.

La valeur de t_t peut être calculée en égalisant la pénétration du jet des équations des deux régimes. L'équation du temps de transition pour un carburant quelconque est donc donnée par l'équation 4.9.

$$t_t = \frac{K_{carb,déc}^{3/2}}{K_{carb,lin}^{3/2}} \left[\frac{\Delta P}{\rho_{amb}} \right]^{-0,225} \quad (4.9)$$

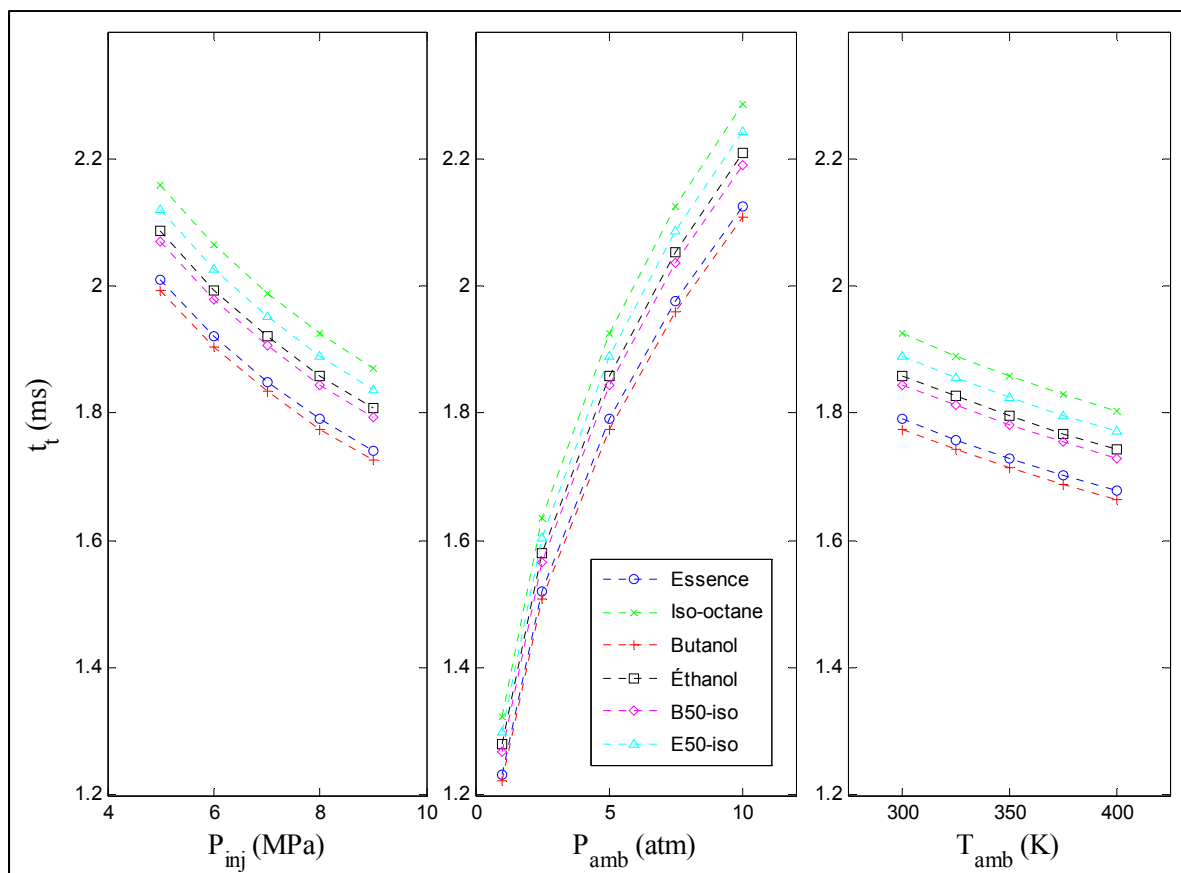
En manipulant le ratio des constantes d'amplitude à l'aide des équations 4.7 et 4.8, le terme du temps de transition devient alors égal à l'équation 4.10.

$$t_t = 1,874\ 99 \left[\frac{\rho_{carb} T_{ebul_{carb}}}{303\ 810} \right]^{-0,45} \left[\frac{\Delta P}{\rho_{amb}} \right]^{-0,225} \quad (4.10)$$

Ainsi, la valeur du temps de transition est fonction de la masse volumique et de la température d'ébullition d'un carburant donné. De plus, elle est fonction des conditions du milieu environnant définies par le différentiel de pression et la masse volumique. Il est à noter que les valeurs chiffrées de l'équation 4.10 proviennent du fait que certains paramètres sont constants et ne changent pas pour un carburant donné. Ces paramètres sont ceux rattachés aux propriétés du butanol qui est utilisé comme carburant de référence dans le calcul des constantes d'amplitude. Ici, l'équation 4.10 a été développée en utilisant les données expérimentales obtenues pour une durée d'injection de 2ms. Il a été mentionné, au préalable, que la durée d'injection agissait, en quelque sorte, comme un temps de transition nominal. Ce temps pouvait être pondéré, et l'équation 4.10 le montre, par d'autres facteurs externes tels que les conditions ambiantes et les propriétés physiques. À l'équation 4.10 devrait être ajouté un facteur tenant en compte la durée d'injection. L'équation 4.11 présente le temps de transition pour une durée d'injection différente de 2ms.

$$t_t = 1,874\ 99 \left[\frac{\rho_{carb} T_{ebul_{carb}}}{303\ 810} \right]^{-0,45} \left[\frac{\Delta P}{\rho_{amb}} \right]^{-0,225} \left[\frac{t_{inj}}{2ms} \right] \quad (4.11)$$

Ici, la valeur de t_{inj} doit être donnée en ms, ΔP est en MPa, ρ est en kg/m³, h_{fg} est en MJ/Kg et T_{ebul} est en K. Finalement, la constante 1,87499 a les unités suivantes : mm^{9/20}s^{11/20}. Par contre, aucune analyse subséquente ne sera faite en regard à la durée d'injection. Maintenant, afin de mieux comprendre le comportement du paramètre t_t , le Graphique 4.5 illustre comment chacune des variables affecte le temps de transition et de quelle façon se comporte ce point en fonction des différents paramètres définissant les conditions environnantes. Tout d'abord, en ce qui a trait à la pression d'injection, il semble que plus la pression d'injection est élevée, plus rapidement la transition entre les deux régimes se produit. Cette tendance est d'ailleurs observable sur les courbes de pénétration expérimentales présentées au Graphique 3.2.



Graphique 4.5 Variation du paramètre t_t en fonction des conditions environnementales pour différents carburants

Il est possible d'expliquer ce phénomène par le fait qu'un accroissement de la pression d'injection se traduit par une vitesse de jet plus élevée. Comme il en a été discuté à la section 3.3, une vitesse de jet plus élevée génère des gouttelettes plus fines, de par un nombre de Weber élevé, ce qui a tendance à freiner le jet plus rapidement, d'où un temps de transition plus court.

Ensuite, la tendance du temps de transition indique que celui-ci augmente avec une augmentation de la pression ambiante. En effet, le Graphique 4.5 indique un accroissement important du temps de transition pour une pression ambiante allant de 1atm à 10atm. Cette variation est considérablement plus notable que pour les autres cas présentés. Cette tendance est bien illustrée sur les courbes de pénétration expérimentale présentées au Graphique 3.4. Comme il a été discuté à la section 3.4, le paramètre clé est la masse volumique du milieu

environnant. Effectivement, un accroissant de la masse volumique nuit au développement du jet et se traduit par une vitesse de jet plus faible. Cette vitesse affaiblie a comme conséquence un SMD supérieur et ainsi, les gouttelettes ont tendance à être moins affectées par les forces aérodynamiques et donc, le jet demeure plus longtemps dans le régime linéaire.

À présent, pour le cas de la température ambiante, une augmentation de la température ambiante accélère la transition entre les deux régimes. Ceci est quelque peu discernable au Graphique 3.7. Cependant, parmi les trois cas étudiés au Graphique 4.5, la température ambiante est celle qui semble influencer le moins le temps de transition. Ceci peut expliquer pourquoi la tendance est plus difficile à observer sur les courbes expérimentales de pénétration de jet. La tendance descendante du point de transition pour une augmentation de la température ambiante est le résultat d'une combinaison de deux mécanismes. Tout d'abord, l'augmentation de la température se traduit par une diminution de la masse volumique et donc une réduction du temps de transition. Ensuite, les mécanismes évaporatifs, qui prennent de plus en plus d'importance à haute température, vont avoir tendance à diminuer la taille moyenne des gouttelettes présentes dans le jet de carburant, par une évaporation accrue du carburant. En retour, cette diminution des gouttelettes va contribuer à ralentir davantage le jet et ultimement de forcer le transit d'un régime à l'autre plus rapidement.

Finalement, la dernière tendance observable au Graphique 4.5 est celle du temps de transition pour chacun des carburants. En effet, l'ordre des carburants est respecté pour les trois graphiques. L'iso-octane a toujours le temps de transition le plus long, et le butanol, celui le plus court. Par contre, cette tendance n'est pas notable sur les courbes expérimentales de pénétration présentées au Graphique 3.1. Au Graphique 4.5, la différence entre les temps de transition des deux extrêmes est relativement constante à environ 10%. Possiblement que cet écart n'est pas suffisamment significatif pour faire une différence sur les courbes de pénétration. Ainsi, l'écart dû au carburant semble trop petit et les résultats expérimentaux ne montrent pas une variation discernable. En observant l'équation 4.10, il peut être noté que le produit de la masse volumique du carburant avec sa température semble faire la différence.

Encore une fois, il est important de prendre la valeur de ces propriétés aux conditions standards de 1atm et 298K. Il semble donc que le temps de transition soit inversement proportionnel, à la fois, à la masse volumique et à la température d'ébullition du carburant. Cependant, il faut noter qu'une haute température d'ébullition ne mène pas nécessairement à un faible temps de transition, la valeur de la masse volumique doit être prise en considération.

Dans cette section, la signification du temps transition ainsi que comment celui-ci est affecté par les différents paramètres régissant les différents mécanismes du jet ont été abordés. De façon générale, il a été vu que la transition du régime linéaire au régime décroissant se produit lorsque la balance des forces passe d'un côté à l'autre. En effet, l'hypothèse qu'initialement les forces de quantité de mouvement dominant et donnent place à une pénétration à taux constant a été émise. Par la suite, aux alentours du temps correspondant à la fermeture de l'injecteur, les forces aérodynamiques prennent le dessus et le taux de pénétration se met subitement à décroître. Le temps où se produit cette transition dépend des conditions ambiantes ainsi que des propriétés physiques du carburant. Toutefois, il a été vu que la pression ambiante est la variable qui affecte le plus cette transition. À la section suivante, il sera discuté de la nécessité d'intégrer un terme correctif, aux corrélations de pénétration existantes, pour la température ambiante.

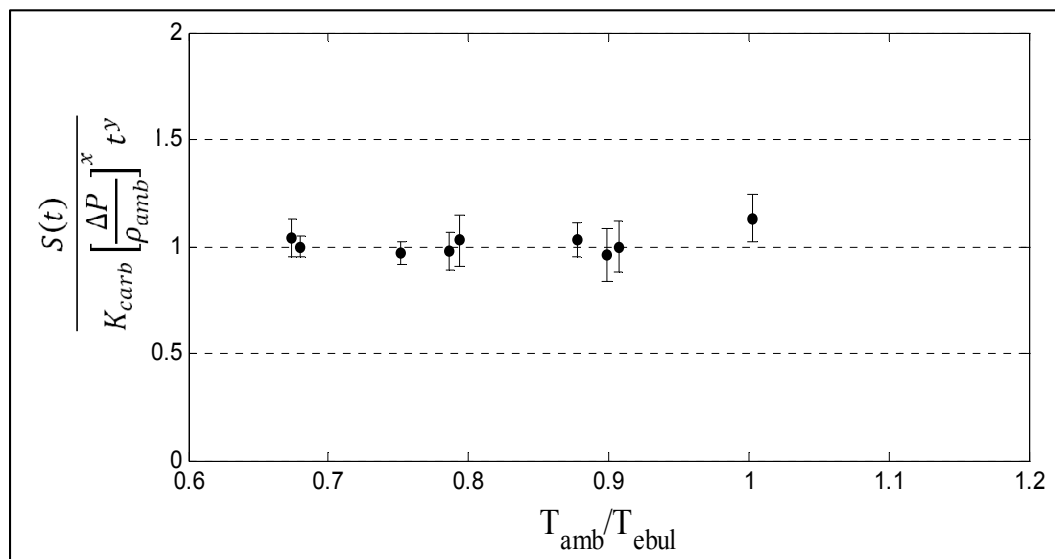
4.5 Intégration de la température ambiante

Dans ce chapitre, une corrélation a été développée afin d'exprimer la pénétration du jet en fonction du temps. Cette corrélation a été développée en prenant en compte les conditions d'injection ainsi que les propriétés physiques des différents carburants. Toutefois, les résultats expérimentaux utilisés pour construire le modèle ont tous été réalisés à 300K. Les résultats expérimentaux présentés à la section 3.5 ont montré que la température du milieu ambiant influençait la pénétration du jet. Afin de voir si un terme doit ajouté afin de modifier les corrélations de pénétration pour prendre en compte la température ambiante, neuf essais ont été réalisés tel que présenté au Tableau 2.2. La même méthodologie que celle utilisée aux

sections 4.3.1 et 4.3.2 pour déterminer les exposants de la corrélation sera utilisée pour obtenir le poids relatif associé à l'effet de la température ambiante. Ainsi, la première étape est de prendre l'équation 4.1 et d'isoler le ratio des températures. La nouvelle formulation est présentée à l'équation 4.12.

$$\left[\frac{T_{amb}}{T_{ref}} \right]^z = \frac{S(t)}{K_{carb} \left[\frac{\Delta P}{\rho_{amb}} \right]^x t^y} \quad (4.12)$$

Par la suite, il suffit de tracer, pour chacun des points d'opération (neuf au total), la valeur du terme de droite, de l'équation 4.12, en fonction du ratio de température, c'est-à-dire le terme de gauche de l'équation 4.12. La méthode est identique à celle utilisée pour créer l'exemple au Tableau 4.1. De plus, pour des raisons de clarté, la moyenne est effectuée sur toute la plage de temps et ce sont ces valeurs qui sont présentées en fonction du ratio des températures au Graphique 4.6. On peut remarquer deux éléments très intéressants. Tout d'abord, pratiquement tous les points sont alignés et égaux à un. Ensuite, la façon dont les points sont alignés suggère que l'exposant du ratio des températures présentées à l'équation 4.1 est zéro et donc, que l'importance du facteur de correction est nulle.



Graphique 4.6 Comportement des courbes de pénétration à haute température

Ainsi, le Graphique 4.6 démontre que la configuration actuelle de la corrélation de pénétration du jet ne nécessite pas l'ajout d'un facteur correctif pour prendre en compte les effets d'une élévation de la température. Il a été vu, au préalable, qu'une augmentation de la température ambiante affecte le jet à deux niveaux. Tout d'abord, une diminution de la masse volumique est prise en compte dans le terme $\Delta P/\rho_{amb}$, puis le comportement évaporatif des carburants est pris en compte dans le calcul des constantes d'amplitude pour les régimes linéaire et décroissant. Cependant, il est intéressant de voir que les valeurs des constantes d'amplitude, qui ont été calculées avec les propriétés physiques prises à 300K, restent valides à des températures de 350K et 400K.

4.6 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, des corrélations ont été développées à l'aide des résultats expérimentaux. Tout d'abord une corrélation pour la pénétration du jet en fonction du temps a été définie. Cette corrélation est construite à l'aide de trois termes. Tout d'abord, une constante d'amplitude qui dépend uniquement des propriétés physiques des carburants, ensuite, le terme de différentiel de pression pondéré par la masse volumique du milieu ambiant et, finalement, le terme de temps. Il a été vu que, bien que les termes soient les mêmes, les exposants sont différents pour les régimes linéaire et décroissant. Par la suite, une corrélation a été développée afin de créer un lien entre les propriétés physiques des carburants et la valeur des constantes d'amplitude. Cette corrélation est constituée de ratio de propriétés physiques. Ces ratios sont déterminés à l'aide d'un carburant de référence; le butanol. Encore une fois, les constantes d'amplitude ne sont pas les même pour les deux régimes. Effectivement le poids relatif des ratios varie d'un régime à l'autre. Il a également été vu que l'ensemble de la corrélation développée était suffisamment élaboré pour prendre en compte les changements au niveau des courbes de pénétration lors des essais à température élevée. Les équations pour le régime linéaire et décroissant sont respectivement présentées à nouveau ci-dessous.

$$S(t) = K_{carb,lin} \left[\frac{\Delta P}{\rho_{amb}} \right]^{1/4} t$$

$$S(t) = K_{carb,déc} \left[\frac{\Delta P}{\rho_{amb}} \right]^{0.1} t^{1/3}$$

Finalement, l'analyse du point de transition entre les deux régimes a montré qu'il est possible de calculer un paramètre t_t qui définit le temps auquel se produit cette transition. Il a été vu que ce point de transition est variable et dépend entre autres du milieu ambiant, caractérisé par le terme de différentiel de pression pondéré par la masse volumique du milieu ambiant, ainsi que par le produit de la masse volumique du carburant avec sa température d'ébullition, à 1atm. L'équation du temps de transition est présentée de nouveau ci-dessous pour une durée d'injection de 2ms.

$$t_t = 1,874\ 99 \left[\frac{\rho_{carb} T_{ebul_{carb}}}{303\ 810} \right]^{-0.45} \left[\frac{\Delta P}{\rho_{amb}} \right]^{-0,225}$$

L'élaboration du modèle analytique a permis déterminer quelles variables sont importantes et à quels instants ce qui vient répondre au troisième sous-objectif présenté à la section 1.4. Par exemple, il a été vu que le paramètre d'environnement externe, caractérisé par $\Delta P/\rho_{amb}$, est relativement plus important durant le régime linéaire avec un poids relatif de 0,33 comparativement à 0,1 pour le régime décroissant. Ensuite, l'analyse de la constante d'amplitude des carburants, régie par les propriétés physiques, a permis, entre autres, d'identifier la quantité de mouvement comme étant l'une des forces prédominantes gouvernant la pénétration du jet et ce, pour les deux régimes. À présent que le modèle analytique est défini, il sera question, au prochain chapitre, de valider ce modèle avec les résultats expérimentaux présentés au chapitre 3.

CHAPITRE 5

VALIDATION DU MODÈLE EMPIRIQUE

5.1 Introduction

Au chapitre 4, des corrélations ont été développées dans le but de prédire la pénétration d'un jet de carburant. Ces corrélations ont été réalisées en manipulant les données expérimentales présentées au chapitre 3. Ainsi, les corrélations englobent, dans un premier temps, toutes les variables qui ont trait à l'environnement ambiant du jet, puis séparément, celles qui ont trait aux propriétés physiques du carburant. Le code Matlab du ME est présenté à l'ANNEXE VII. Dans le présent chapitre, l'objectif est de valider le ME, qui regroupe l'ensemble des corrélations. Pour ce faire, les données expérimentales seront couplées aux corrélations dans le but de valider le modèle. Dans un premier temps, il sera question des méthodes de validation qui permettront aussi de quantifier l'incertitude aléatoire des données expérimentales. Cette intervalle ou incertitude viendra justifiée, en partie, l'écart qui existe entre le ME et les données expérimentales. Dans un second temps, en quantifiant l'incertitude attribuable aux instruments de mesure, il sera possible de déterminer l'incertitude totale du système en couplant les deux types d'incertitude. Finalement, les limites de validité du modèle seront définies pour certains alcanes et alcools.

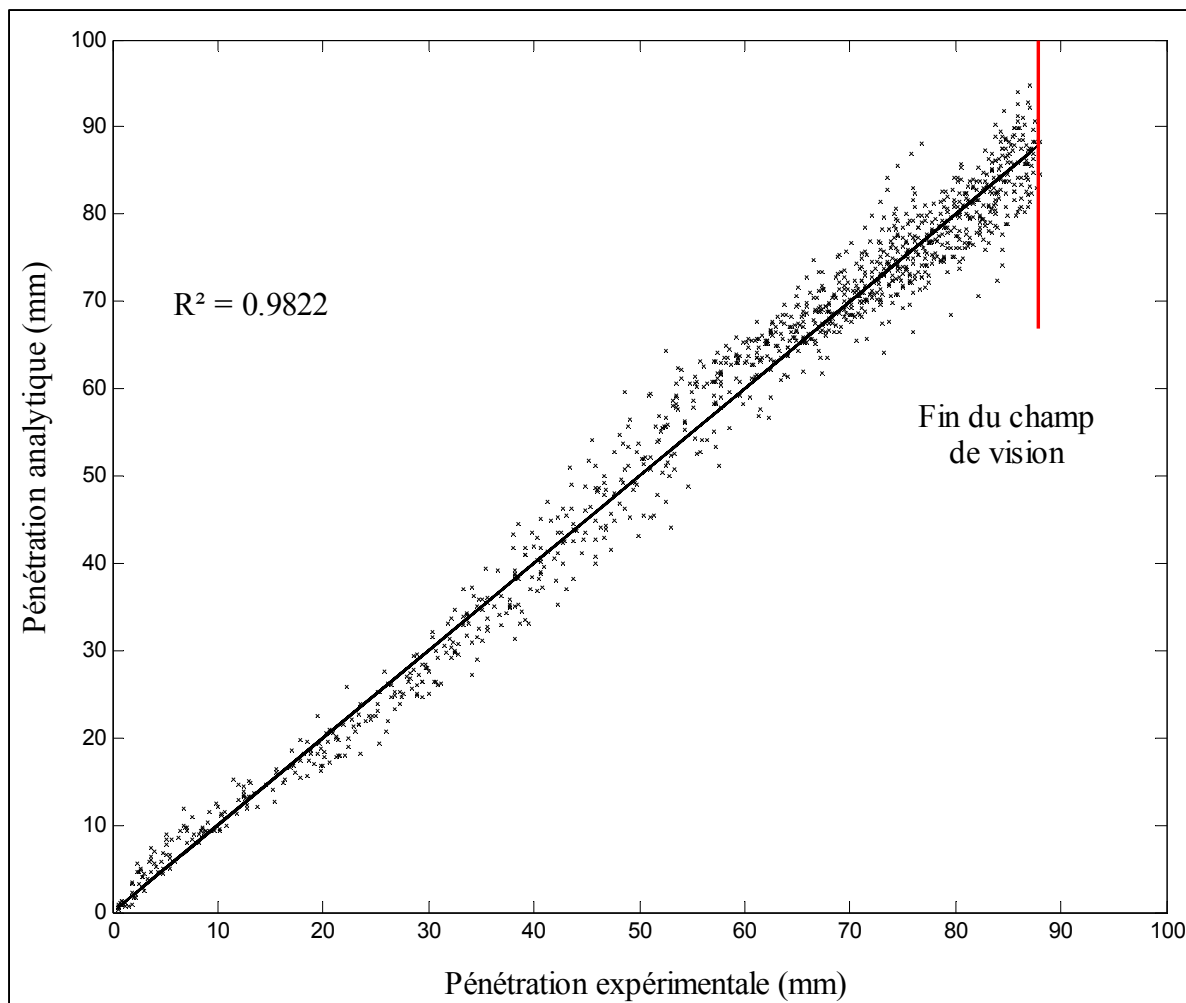
5.2 Méthodes de validation

Dans cette section, le ME sera validé de différentes façons. D'abord, en utilisant des méthodes statistiques et par la suite en le comparant avec les données expérimentales.

5.2.1 Validation statistique

Tout d'abord, dans cette section, le ME sera validé en le comparant aux données expérimentales. Pour ce faire, un graphique mettant en relation les données prédites, en

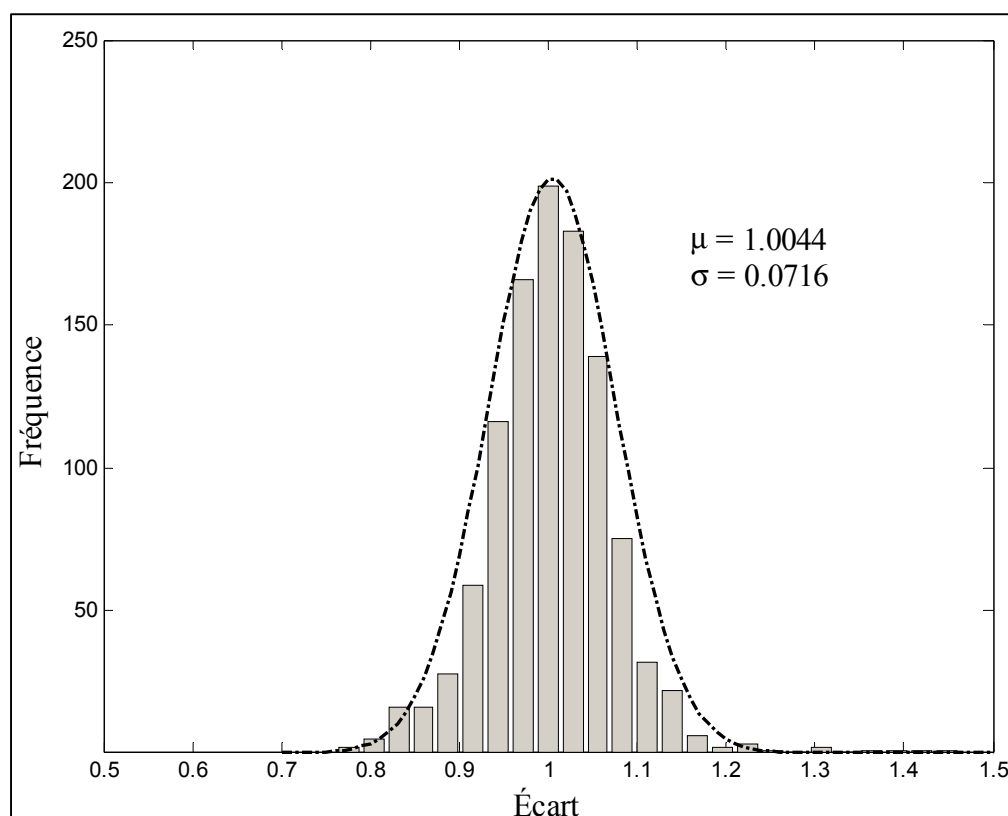
ordonnée, et les données expérimentales, en abscisse, est construit. Ainsi, pour chacun des carburants (six en tout) et pour chacune des conditions de test effectuées, tous les points de la courbe de pénétration sont placés dans ce graphique. Ceci produit un nuage de point d'approximativement 1 100 points qui est présenté au Graphique 5.1.



Graphique 5.1 Pénétration expérimentale en fonction de la pénétration prédite par le ME

Au Graphique 5.1, on remarque que le ME prédit fidèlement la valeur des pénétrations expérimentales. De plus, la régression linéaire du nuage de points permet d'obtenir une valeur de coefficient de détermination (R^2) de 98,22%. La valeur élevée du R^2 suggère un fort lien entre les valeurs prédites et expérimentales. D'ailleurs, ce nuage de points

s'approche de celui présenté par Desantes *et al.* (2005), qui obtiennent un coefficient de détermination de 98,08% et ce, avec un échantillon d'environ 28 000 points. Cependant, il est judicieux d'utiliser la valeur du R^2 en parallèle avec d'autres outils d'analyse de données afin de valider les corrélations. Dans le but d'illustrer l'écart relatif entre le modèle et les données expérimentales, un exercice similaire à celui accompli pour générer le Graphique 5.1 est effectué. Cette fois, les valeurs de pénétration prédites sont divisées par les valeurs expérimentales. Encore une fois, ceci produit un échantillon d'approximativement 1 100 points. La moyenne est déterminée comme étant de 1,0044, ce qui suggère qu'avec un échantillon assez large, le ME reproduit bien les données expérimentales. Le Graphique 5.2 présente la distribution des données sous forme d'un histogramme.



Graphique 5.2 Distribution du ratio des pénétrations prédites et expérimentales

Au Graphique 5.2, une courbe de type gaussienne a été tracée afin de démontrer que les points sont distribués suivant une loi normale de moyenne (μ) = 1,0044 et d'écart-type (σ) = 0,0716. Ainsi, la symétrie de la courbe gaussienne démontre que le modèle n'a pas une

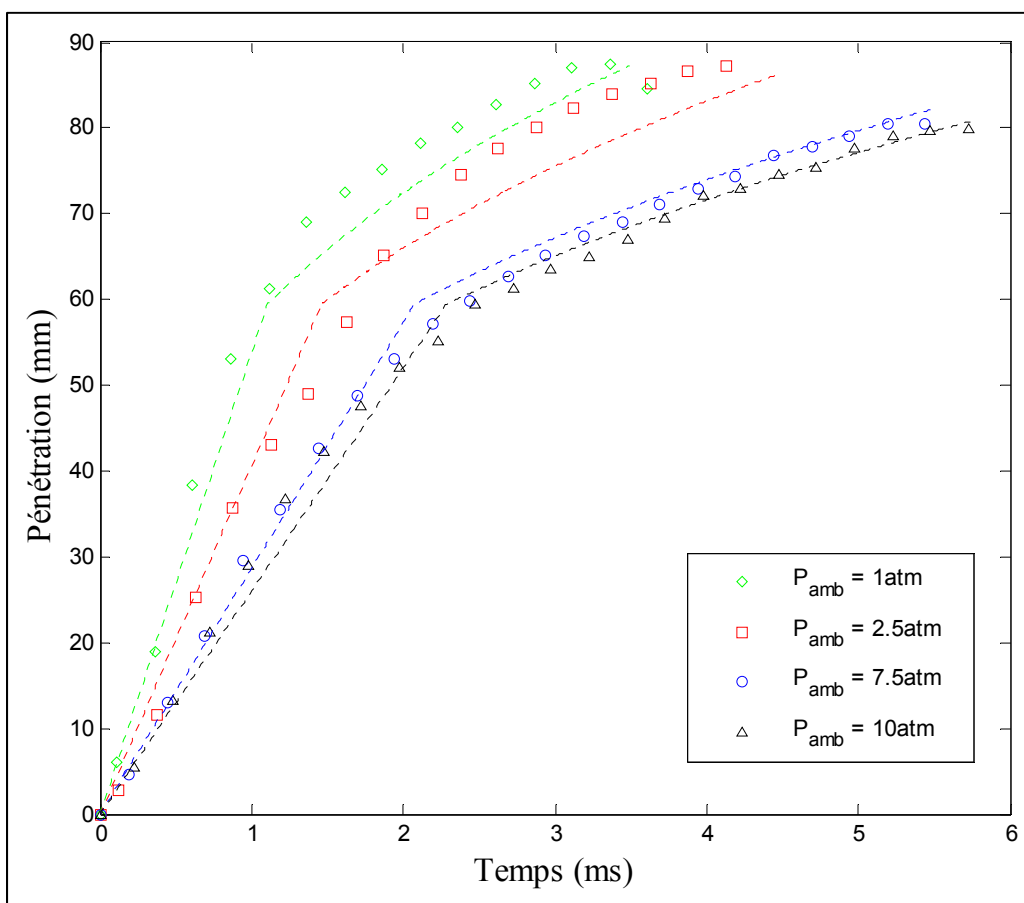
tendance globale à sur ou sous-évaluer les courbes de pénétrations et que, malgré une variabilité notable, le modèle reproduit bien les données expérimentales. Ainsi, il peut être dit que les variations observées sont réellement aléatoires, puisqu'elles sont distribuées selon une courbe gaussienne. Ceci sera discuté plus en profondeur à la section 5.3.

À la prochaine sous-section, la validation du modèle empirique sera achevée en le comparant à des données expérimentales qui n'ont pas été utilisées pour construire les corrélations qui constituent le ME.

5.2.2 Validation avec de nouvelles données expérimentales

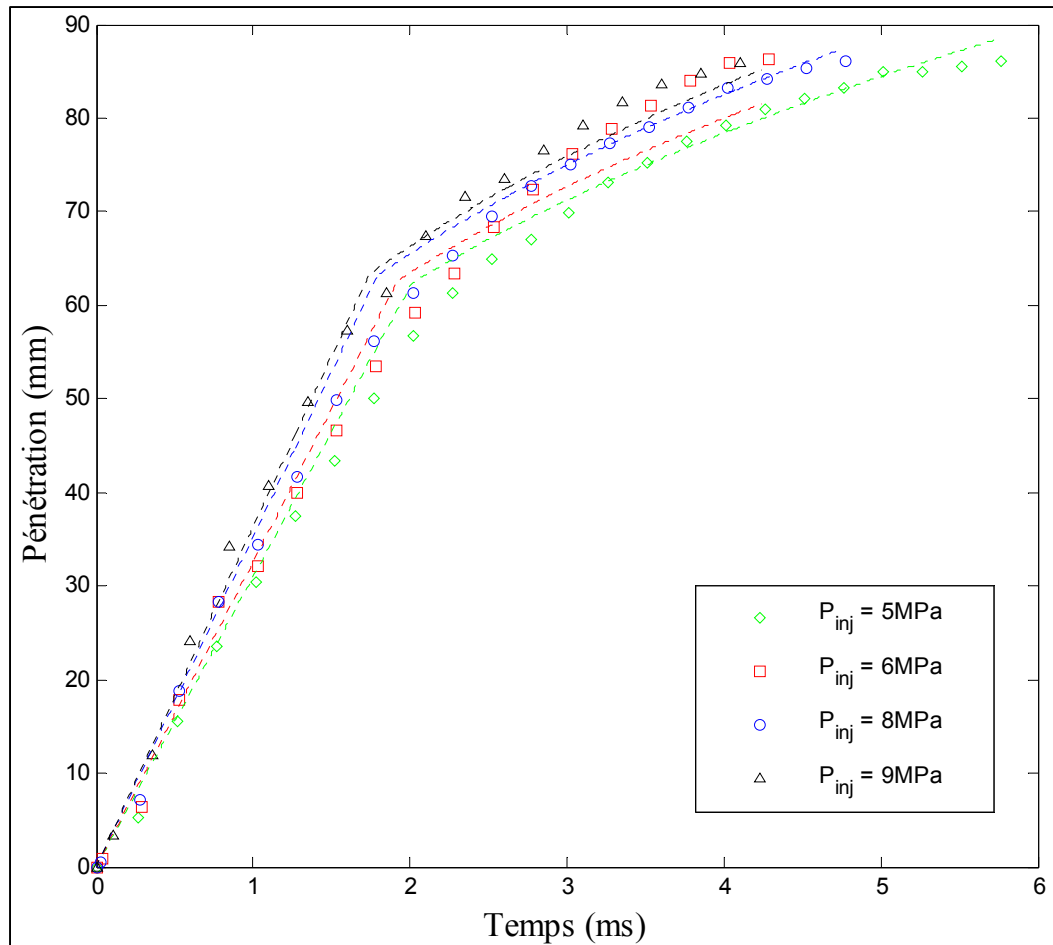
Afin de poursuivre et terminer la validation du modèle, les données expérimentales du B50-iso et de l'essence, qui ne sont pas utilisées pour définir les corrélations, sont comparées aux prédictions. De plus, le B50-iso est constitué d'un mélange de deux carburants, l'iso-octane et le butanol, qui eux, ont été utilisés indépendamment pour définir le ME. Le Graphique 5.3 présente une comparaison des courbes expérimentale et prédite du B50-iso pour différentes pressions ambiantes alors que la pression d'injection est de 8MPa, tandis que le Graphique 5.4 présente les mêmes courbes, mais cette fois pour différentes pressions d'injection alors que la pression ambiante est fixée à 5atm. Le Graphique 5.3 illustre la performance du ME pour prédire de façon satisfaisante les résultats expérimentaux avec une erreur maximale de 6,5% et ce, à une pression ambiante de 2,5atm. Un point intéressant à remarquer est le fait que les corrélations reproduisent bien la faible différence qui existe au niveau des courbes de pénétration lors des conditions de pressions ambiantes de 7,5atm et 10atm. Cette tendance confirme que le modèle réussit à bien reproduire les phénomènes expérimentaux liés à la variation de la pression ambiante. Parmi les courbes présentées au Graphique 5.3, celles aux conditions ambiantes de 1atm et 2,5atm représentent des cas typiques de courbes où le modèle ne performe pas aussi bien. En effet, pour certaines conditions, il semble que le ME prédit moins bien la pénétration du jet.

À son tour, le Graphique 5.4 présente la comparaison des résultats prédictifs et expérimentaux pour l'essence lorsque, cette fois-ci, la pression d'injection est variée. Comme au Graphique 5.3, le ME reproduit bien les résultats expérimentaux.



Graphique 5.3 Comparaison des courbes empiriques et expérimentales pour différentes pressions ambiantes : cas du B50-iso

Il a été mentionné à la section 3.3, que l'influence de P_{inj} sur les courbes de pénétration n'est pas aussi importante que pour une variation de la pression ambiante, par exemple. Ceci est vrai pour le modèle qui, lui aussi, présente un groupement plus serré des courbes. Ainsi, il s'avère que le ME reproduit bien les tendances associées à une variation de la pression d'injection. Cependant, comme au Graphique 5.3, on peut remarquer qu'il semble y avoir certains écarts entre les résultats expérimentaux et ceux prédits. Le pourcentage d'écart maximal, quant à lui, s'élève à 6,3% pour le cas d'une pression d'injection de 6MPa.



Graphique 5.4 Comparaison des courbes empiriques et expérimentales pour différentes pressions d'injection : cas de l'essence

À la prochaine section, il sera discuté des variabilités expérimentales et des incertitudes qui pourraient justifiées ce genre d'écart et permettre de mieux comprendre sa provenance. Cependant, uniquement l'exemple du Graphique 5.3 sera utilisé puisque c'est pour ce cas que le pourcentage d'écart est le plus élevé.

5.3 Quantification des sources d'erreur

Maintenant, il est important de quantifier la variation aléatoire des données. Dans un article écrit par Moffat (1988), celui-ci définit l'incertitude comme étant l'intervalle autour d'une valeur mesurée, à l'intérieur duquel la valeur réelle se trouve. De Plus, deVries *et al.* (2011)

explique que l'incertitude aléatoire peut provenir de plusieurs sources telles que la résolution liée aux outils d'analyse optique et les aberrations du front du jet. Ces incertitudes sont toujours présentes et sont intrinsèquement liées à l'expérimentation. Ainsi, dans le but de quantifier cette incertitude, une méthode statistique utilisée par deVries *et al.* (2011) sera employée. Les auteurs expliquent que les incertitudes aléatoires peuvent être définies par l'écart type entre les valeurs prédites (x_{corr}), dans le cas présent le ME sera utilisé, et expérimentales (x_{exp}) telles que définies à l'équation 5.1.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{corr} - x_{exp})^2}{\nu}} \quad (5.1)$$

Où N est le nombre de données dans l'échantillon et ν , le nombre de degrés de liberté, qui est égale à N pour le cas présent puisque le nombre de données est grand (1 100). Ici, la valeur de S est égale à 3,3%. Par la suite, l'incertitude aléatoire ($P_{S,95\%}$), à un intervalle de confiance de 95%, se trouve en multipliant la valeur de S (eq. 5.1) par la valeur $t_{\nu,0,95}$ provenant d'une distribution t-student (évaluée comme étant de 1.96), tels que présentés à l'équation 5.2.

$$P_{S,95\%} = \pm t_{\nu,0,95} S \quad (5.2)$$

Ainsi, en utilisant cette méthode statistique, l'incertitude aléatoire est calculée comme étant de $\pm 6,47\%$. Comme il est stipulé dans deVries *et al.* (2011) et Lee (2008), l'incertitude totale de la mesure expérimentale provient, en partie, de l'incertitude aléatoire, mais aussi de l'incertitude liée aux instruments de mesure. Ainsi, pour être en mesure de calculer l'incertitude totale, celle liée aux instruments de mesure, telles que définies à la section 2.6, devra être déterminée d'abord.

Il a été vu, à la section 2.6, que différentes sources d'erreur peuvent créer des incertitudes au niveau des données expérimentales. Les sources d'erreur ont été divisées en trois catégories : celles causées par l'injecteur, celles causées par les instruments de mesure et celles causées par le système d'acquisition de données. L'objectif de cette section est de tenter de quantifier

ces sources d'erreur et de tenter de la transposer aux courbes de pénétration. Par la suite, à l'aide de l'incertitude aléatoire, l'incertitude totale peut être calculée. D'abord, chacune des sources d'erreur sera discutée afin de déterminer leur poids relatif. Tout d'abord, la source d'erreur la plus importante est sans doute celle causée par la variabilité expérimentale de l'injecteur. À la sous-section 2.6.1, cette variabilité a été quantifiée comme étant de $\pm 5,2\%$. Il est important de noter que cette valeur comprend, de façon implicite, l'erreur spatiale qui serait causée par une imprécision liée au système d'acquisition de données. Parmi, les autres sources d'erreur, il y a celles directement liées aux instruments de mesure. Tout d'abord, le manomètre utilisé pour la pression d'injection possède une erreur de $\pm 0,345\text{MPa}$. Ensuite, il a été vu que le capteur de pression est précis à l'intérieur de $\pm 7,1\%$ et finalement, le thermocouple possède une erreur de $\pm 3\text{K}$. Afin de transposer ces erreurs aux courbes de pénétrations, le ME sera utilisé. Le cas où la pression ambiante est de $2,5\text{atm}$, présenté au Graphique 5.3, sera utilisé comme exemple puisque ce dernier représente le cas où l'écart semble le plus grand. Ainsi, uniquement les termes comportant le différentiel de pression divisé par la masse volumique des équations 4.3 et 4.5 seront utilisés.

Ainsi, le Tableau 5.1 présente les sources d'erreur telle que transposée aux courbes de pénétration pour les trois instruments de mesure utilisés dans le cadre des essais expérimentaux. Il est à noter qu'une distinction est effectuée au niveau des deux régimes de pénétration. En effet, on peut remarquer que l'impact de l'incertitude des instruments de mesure est plus important pour le régime linéaire. Ceci s'explique par le fait qu'initialement, durant le régime linéaire, la pénétration est plus petite et qu'une faible erreur représente néanmoins un pourcentage élevé. Ainsi, l'impact des instruments de mesure est plus grand de même que l'importance des incertitudes. Par exemple, une imprécision de 1mm sur une distance de 10mm est plus importante que sur une distance de 100mm .

Tableau 5.1 Répercussion des erreurs
liées aux instruments de mesure
sur le modèle analytique

	Linéaire	Décroissant
P_{inj} (Mpa)	$\left(\frac{\Delta P}{\rho_{amb}}\right)^{1/4}$	$\left(\frac{\Delta P}{\rho_{amb}}\right)^{0,1}$
8,000 + 0,345	1,289	1,107
8,000	1,275	1,102
8,000 - 0,345	1,261	1,097
Écart max	1,1%	0,4%

	Linéaire	Décroissant
P_{amb} (atm)	$\left(\frac{\Delta P}{\rho_{amb}}\right)^{1/4}$	$\left(\frac{\Delta P}{\rho_{amb}}\right)^{0,1}$
2,5 + 7,1%	1,254	1,095
2,5	1,275	1,102
2,5 - 7,1%	1,300	1,111
Écart max	2,0%	0,8%

	Linéaire	Décroissant
T_{amb} (K)	$\left(\frac{\Delta P}{\rho_{amb}}\right)^{1/4}$	$\left(\frac{\Delta P}{\rho_{amb}}\right)^{0,1}$
300 + 3	1,277	1,103
300	1,275	1,102
300 - 3	1,271	1,101
Écart max	0,3%	0,1%

À présent, afin de trouver l'incertitude liée aux instruments de mesure, qui inclue les variations de l'injecteur, l'équation 5.3, proposé par Lee (2008) est utilisée pour les deux régimes et se base sur les données du Tableau 5.1.

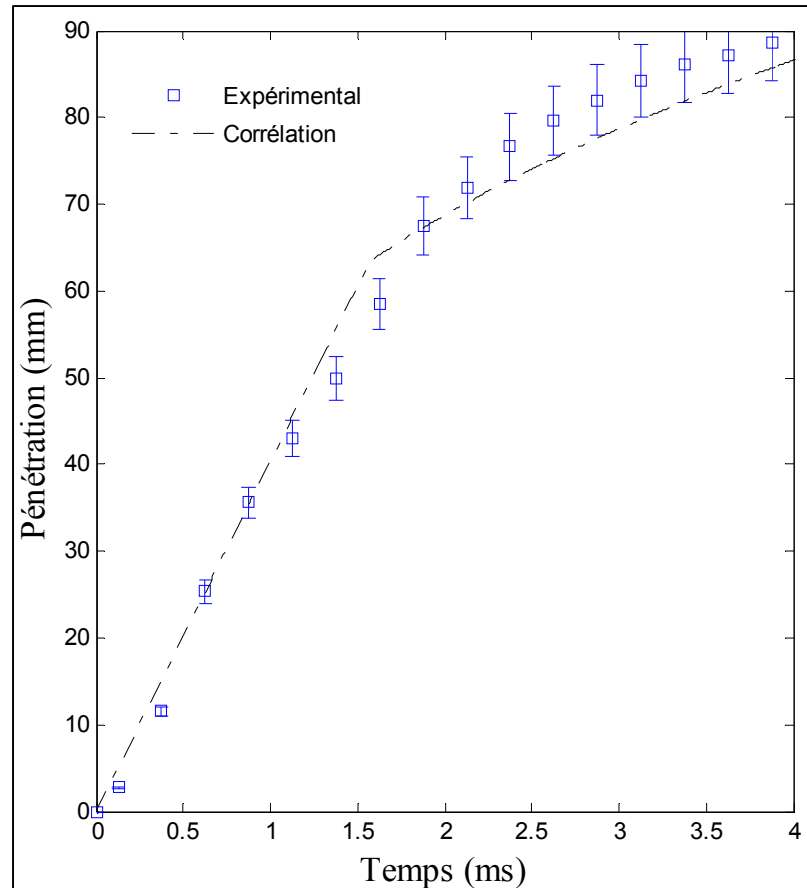
$$E(\%) = 100 \times \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (5.3)$$

À l'équation 5.3, $E(\%)$ représente l'incertitude globale en pourcentage et e représente les erreurs individuelles. Chacune des sources d'erreur discutée au préalable doit être incluse dans l'équation 5.3 et ce, pour les deux régimes. Ces sources d'erreurs sont : l'erreur due à la variabilité de l'injecteur (cette erreur inclue celle du système d'acquisition tel que discuté à la section 2.6.1) ainsi que les trois erreurs attribuables aux instruments de mesure, telles que présentées dans le Tableau 5.1. Finalement, ce calcul permet de trouver que pour le régime linéaire, l'incertitude liée aux instruments de mesure est de $\pm 5,7\%$, tandis que pour le régime décroissant, elle est de $\pm 5,3\%$.

Il devient maintenant possible de calculer l'incertitude totale du système tel que défini dans deVries *et al.* (2011). En effet, il suffit d'additionner le carré des deux incertitudes (l'incertitude aléatoire des données expérimentales ($\pm 6,47\%$) et l'incertitude liée aux instruments de mesure ($\pm 5,3\%$ et $\pm 5,7\%$)) et d'en calculer la racine carrée. Ce calcul permet de trouver que l'incertitude totale de la mesure expérimentale est de $\pm 8,4\%$, pour le régime décroissant et $\pm 8,6\%$, pour le régime linéaire.

À présent, la courbe expérimentale pour le cas de pression ambiante de 2,5atm du Graphique 5.3 est reprise au Graphique 5.5 en traçant les barres d'erreur associées à l'intervalle d'incertitude totale, ce qui permet d'illustrer la bande d'incertitude. Le Graphique 5.5 démontre que la courbe du ME passe par la plage couverte par les barres d'erreur expérimentale à l'exception de deux endroits. D'abord, lorsque l'injecteur est en mode transitoire du régime linéaire (lorsque $t < 0,455\text{ms}$, correspondant aux 10 à 15 premiers millimètres, approximativement), le modèle surestime la pénétration du jet. Ceci est aussi visible au Graphique 5.1. Puisque, à ce moment, le pointeau de l'injecteur n'est pas en position complètement ouverte, celui-ci agit comme une restriction à l'écoulement du carburant dans la buse de l'injecteur. Puisque les corrélations ne prennent pas en compte la

période transitoire de l'injecteur (qui dure 0,455ms), il est normal que le modèle surestime la pénétration. L'autre endroit où le ME n'entre pas dans la plage couverte par les barres d'erreur est aux alentours de la période caractérisée par la transition entre les deux régimes de pénétration.



Graphique 5.5 Comparaison d'une courbe empirique et expérimentale avec barres d'erreur

Il a été vu, à la section 4.4 qu'une zone d'incertitude existe aux alentours du temps de transition t_t , ce qui explique, en partie, pourquoi le modèle semble surestimer la pénétration à ce moment. De plus, la fermeture du pointeau de l'injecteur ne se fait pas de façon instantanée. Comme pour l'ouverture de l'injecteur, c'est un phénomène graduel (0,355ms, voir ANNEXE I).

Sommes toutes, le Graphique 5.5 indique que le ME prédit bien les résultats expérimentaux lorsque l'incertitude totale est prise en considération. Cependant, il est certain que les phénomènes en présence sont très complexes et difficiles à mesurer. Le ME repose sur des variables qui peuvent être contrôlées telles que les propriétés physiques des carburants et les conditions d'injection. Ainsi, les phénomènes plus complexes ont été omis. Parmi ceux-ci, on retrouve les mécanismes transitoires de soulèvement et fermeture du pointeau, l'atomisation, la fragmentation et la taille moyenne des gouttelettes, les phénomènes de recirculation et d'entraînement d'air.

5.4 Récapitulatif du modèle empirique

Le ME ayant été présenté et développé au chapitre 4 a maintenant été validé et il est, à présent, possible d'affirmer que ce dernier est capable de reproduire les courbes de pénétration expérimentales. Cependant, il faut être prudent, car il n'a pas été démontré que le modèle demeure valide en dehors des conditions qui ont été testées. Il est donc important d'établir les bornes de validité du modèle que ce soit au niveau des conditions ambiantes de tests ou même des propriétés physiques qui caractérisent les carburants employés. Avant tout, voici un rappel des équations principales qui régissent le ME. Tout d'abord, il est important de faire la distinction entre les deux régimes en présence; le régime linéaire et le régime décroissant. Les équations suivantes, déjà présentées aux équations 4.3, 4.5, 4.7, 4.8 et 4.10, présentent les corrélations utilisées pour chacun des régimes de pénétration. D'abord, pour l'équation globale du régime linéaire (eq. 4.3),

$$S(t) = K_{carb} \left[\frac{\Delta P}{\rho_{amb}} \right]^{1/4} t$$

ensuite, celle du régime décroissant (eq. 4.5),

$$S(t) = K_{carb} \left[\frac{\Delta P}{\rho_{amb}} \right]^{0.1} t^{1/3}$$

Par la suite, les valeurs des constantes d'amplitude des carburants (K_{carb}) sont définies par les corrélations présentées au préalable. Tout d'abord, pour le régime linéaire (éq. 4.7),

$$K_{carb,i} = K_{carb,ref} \left[\frac{\rho_{carb,i}}{\rho_{carb,ref}} \right]^{1.4} \left[\frac{h_{fg,carb,i}}{h_{fg,carb,ref}} \right]^{-1/4} \left[\frac{T_{ebul,carb,i}}{T_{ebul,carb,ref}} \right]^{-1/5}$$

ensuite, pour le régime décroissant (éq. 4.8),

$$K_{carb,i} = K_{carb,ref} \left[\frac{\rho_{carb,i}}{\rho_{carb,ref}} \right]^{1.1} \left[\frac{h_{fg,carb,i}}{h_{fg,carb,ref}} \right]^{-1/4} \left[\frac{T_{ebul,carb,i}}{T_{ebul,carb,ref}} \right]^{-1/2}$$

Ici, les valeurs des constantes d'amplitude de référence ($K_{carb,ref}$) sont des valeurs expérimentales. Dans le cadre de ce travail, le carburant de référence ayant été choisi est le butanol et les valeurs des constantes K_{carb} , pour les régimes linéaire et décroissant, sont respectivement de $32,37 \text{ mm}^{1/2}/\text{s}^{1/2}$ et $49,22 \text{ mm}^{4/5}/\text{s}^{2/15}$.

Finalement, afin de déterminer le point de transition entre les deux régimes, la valeur du temps de transition (t_t) doit être calculée selon la corrélation ci-dessous (éq. 4.10).

$$t_t = 1.874 \, 99 \left[\frac{\rho_{carb} T_{ebul,carb}}{303 \, 810} \right]^{-0,45} \left[\frac{\Delta P}{\rho_{amb}} \right]^{-0,225}$$

Ainsi, lorsque $t < t_t$, on prendra les équations pour le régime linéaire et lorsque $t > t_t$, les équations pour le régime décroissant seront utilisées. Il est aussi important de mentionner que pour avoir une courbe de pénétration en millimètre et un temps donné en milliseconde, il faut porter attention aux unités des variables présentées dans les corrélations. Conséquemment, ΔP est en MPa, ρ est en kg/m^3 , t est en ms, h_{fg} est en MJ/Kg et T est en K.

À présent, les bornes de validité du ME sont définies comme étant les même qu'utilisées pour les essais expérimentaux. En ce qui a trait aux conditions ambiantes, il est stipulé que le

modèle demeure valide pour des pressions d'injection allant de 5MPa à 9MPa, des pressions ambiantes allant de 1atm à 10atm et pour des températures ambiantes entre 300K et 400K. Maintenant, au niveau des propriétés physiques des carburants, les extrêmes des trois propriétés physiques principales, soit ρ , h_{fg} et T_{ebul} , qui ont été présentés au Tableau 2.1, seront utilisés en tant que bornes de validité. Par la suite, il pourra être assumé que si les propriétés physiques d'un carburant quelconque se trouvent à l'intérieur des limites définies, les courbes de pénétration seront assumées comme étant valides. Les bornes en question sont définies comme étant entre 688Kg/m³ et 781Kg/m³ pour la masse volumique; entre 271,5MJ/Kg et 725,7MJ/Kg pour l'enthalpie de vaporisation et, entre 351K et 398K pour la température d'ébullition. Afin d'illustrer ces bornes, le Tableau 5.2 montre un exemple appliqué aux alcanes et aux alcools.

Tableau 5.2 Propriétés physiques de différents alcanes et alcools

<u>Alcanes</u>	ρ (kg/m³)	h_{fg} (MJ/kg)	T_{ebul} (K)
Pentane	619	368	309
Hexane	655	370	341
Heptane	680	363	372
Octane	698	372	399
Nonane	714	356	424
Décane	728	372	447
<u>Alcools</u>			
Méthanol	786	980	338
Éthanol	781	725	351
Propanol	800	670	370
Butanol	779	495	390
Pentanol	810	653	411

Les substances choisies sont celles qui sont à leur phase liquide aux conditions de tests. Ainsi, au Tableau 5.2, la zone grise correspond aux propriétés qui se trouvent à l'intérieur des limites. En ce qui a trait aux alcanes, on peut remarquer qu'uniquement l'heptane et l'octane ont leurs trois propriétés entièrement à l'intérieur des bornes. Cependant, l'hexane et le nonane pourraient, à la limite, être considérés. Tandis que pour les alcools, on remarque que le propanol et le pentanol semblent, eux aussi, tout juste à la limite de ces bornes. Cet exercice pourrait être réalisé pour différents carburants et même pour des mélanges comme dans le cas du E50-iso et du B50-iso. En effet, puisque les corrélations se sont montrées valides pour ces deux derniers, il peut être assumé que d'autres mélanges, en différentes proportions, pourraient être simulés à l'aide du modèle empirique. Il est important de comprendre que la valeur des propriétés physiques varie d'une source à l'autre. Pour cette raison, la décision, basée sur les propriétés physiques, d'utiliser les corrélations avec un carburant quelconque doit être prise de façon subjective. Pour ce travail, la totalité des propriétés physiques provient de la même source, soit le Yaws (2003).

5.5 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, le modèle analytique bâti à l'aide des corrélations présentées au chapitre 4 a été validé. L'objectif était de déterminer jusqu'à quel point le ME pouvait reproduire, de façon fidèle, les différentes courbes expérimentales. Pour ce faire, des outils statistiques ont été utilisés pour quantifier l'incertitude aléatoire. Ainsi, elle a été quantifiée comme étant de $\pm 6,47\%$. Ensuite, la sommation de toutes les sources d'erreur s'élève à $\pm 5,3\%$, pour le régime décroissant et $\pm 5,7\%$, pour le régime linéaire. Ces deux types d'incertitude peuvent être couplés afin de calculer l'incertitude totale du système, ce qui donne $\pm 8,4\%$ et $\pm 8,6\%$, respectivement. Par la suite, les limites du modèle ont été définies à l'aide des conditions de tests ainsi que des propriétés physiques des carburants utilisés. Ces bornes aident à définir une zone dans laquelle il peut être affirmé avec confiance que le ME produira des courbes de pénétration justes. Pour élargir cette zone de confiance, d'autres essais devraient être effectués à d'autres conditions et avec d'autres carburants.

CONCLUSION

L'objectif principal de cette recherche visait à déterminer l'influence des paramètres externes aux jets et des propriétés physiques de différents carburants sur les courbes de pénétration. Pour ce faire, des sous-objectifs ont été établis. D'abord, caractériser les mécanismes prédominants liés à l'environnement d'injection, c'est-à-dire, pression et température ambiante ainsi que pression d'injection. Ensuite, déterminer de quelles façons les propriétés physiques des carburants affectent les courbes de pénétration. Finalement, développer une corrélation empirique pouvant reproduire les courbes de pénétration expérimentale et qui permette d'apprécier l'importance relative de chacun des paramètres à l'étude.

L'analyse des résultats expérimentaux a permis d'identifier les mécanismes prédominants suivant : la quantité de mouvement, les forces aérodynamiques, l'évaporation et les mécanismes de fragmentations du jet. Ainsi, cette analyse a permis de comprendre de quelles façons les paramètres clés de cette étude (pression d'injection, pression ambiante, température ambiante, durée d'injection et propriétés physiques des carburants) influencent les courbes de pénétration ce qui répond aux deux premiers sous-objectifs de ce travail, tel que mentionnés ci-haut.

Ensuite, les notions acquises lors de l'analyse des résultats expérimentaux à permis de construire un modèle empirique, constitué d'un ensemble de corrélations. Puisque les corrélations sont élaborées à l'aide des paramètres qui ont été identifiés comme étant les plus importants le modèle a le potentiel de pouvoir reproduire les courbes de pénétration de plusieurs carburants dans plus conditions ambiantes. Pour en être sûr, le modèle à donc dû être validé.

Le ME a été validé en utilisant les résultats expérimentaux qui n'avaient pas été utilisés pour sa construction. Par la suite, l'ensemble des résultats expérimentaux a été comparé aux résultats prédits. Cet exercice a permis de réaliser que le modèle reproduit bien les courbes expérimentales. En effet, l'incertitude totale des données expérimentales a été quantifiée

comme étant de $\pm 8,4\%$, pour le régime décroissant et $\pm 8,6\%$, pour le régime linéaire. En somme, le modèle a démontré qu'il est possible, à l'intérieur de certaines limites, de reproduire les courbes de pénétration de différents carburants et même de mélanges de carburants.

RECOMMANDATIONS

Suite aux essais expérimentaux ainsi qu'à la rédaction de ce mémoire, certaines recommandations sont formulées dans le but d'améliorer certains points dans l'optique où ces travaux sont poursuivis.

Tout d'abord, la première recommandation se situe au niveau de l'expérimentation. Le test de répétabilité effectué sur l'injecteur a démontré une variabilité en ce qui a trait aux courbes de pénétrations. Ainsi, il serait recommandé de tenter de refaire certains essais en les répétant au moins trois fois.

Par la suite, ces travaux ont démontré qu'il y aurait un intérêt important à mieux comprendre les mécanismes de fragmentation des gouttelettes. Ainsi, il serait recommandé d'ajouter un système de diagnostic optique tel que PDPA, PIV ou LIF afin de mesurer le SMD du jet et de voir de quelles façons celui-ci est affecté lors des différents tests.

Ensuite, quoique dispendieux, il serait recommandé de refaire les essais en utilisant une caméra haute vitesse avec une meilleure résolution. D'abord, ceci permettrait de mieux comprendre les moments transitoires d'ouverture et de fermeture de l'injecteur, mais aussi d'avoir des courbes plus lisses et moins bruyantes. Ceci permettrait même d'être en mesure d'obtenir de plus belles courbes de vitesse instantanée de fronts de jets.

Finalement, il serait intéressant d'utiliser des outils de simulation numérique, validé et ajusté à l'aide des résultats expérimentaux, afin de comparer avec le modèle empirique. Ceci permettrait d'accroître la compréhension des mécanismes en présence.

ANNEXE I

SPÉCIFICATION TECHNIQUE DE L'INJECTEUR

***** SIEMENS AUTOMOTIVE *****

SERIAL NUMBER	15043B	TEMPERATURE	20.0	[°C]
DATE	7/17/99	PRESSURE	50	[Bar]
TESTED BY	JDO	RESISTANCE	1.80	[Ohm]
TEST FLUID	n-Heptane	DRIVER	SIEMENS NN	
SPECIFIC GRAVITY	0.685	VOLTAGE	14.0	[V DC]

T open :	455	[uS]	I peak :	10	[A]
T close:	355	[uS]	I hold :	3.0	[A]
à 35.0[ø]ø25		[mm]			

STATIC FLOW

1	2	3	AVG WT [gm]	RUN TIME [S]	AVG FLOW [gm/S]
28.53	28.58	28.42	28.51	3.00	9.503

DYNAMIC DATA

DRIVER SETTINGS [mS]			WEIGHT [gm]			Avg.	TARGET	LINEAR
PW	Period	#Pulses	1	2	3	mg/inj.	mg/inj.	ERROR%
0.30	10.00	3000	7.56	7.53	7.53	2.51	2.41	4.07
0.35	10.00	3000	9.16	9.17	9.16	3.05	2.90	5.26
0.40	10.00	3000	11.51	11.53	11.53	3.84	3.39	13.34
0.45	10.00	3000	12.48	12.46	12.46	4.16	3.88	7.22
0.50	10.00	3000	13.48	13.50	13.48	4.50	4.36	3.04
0.55	10.00	2000	9.58	9.57	9.59	4.79	4.85	-1.23
0.60	10.00	9000	46.82	46.95	47.02	5.21	5.34	-2.29
0.65	10.00	2000	11.23	11.28	11.30	5.63	5.82	-3.24
0.70	10.00	2000	12.24	12.22	12.23	6.11	6.31	-3.10
0.75	10.00	2000	13.52	13.50	13.52	6.76	6.80	-0.60
0.80	10.00	2000	14.90	14.89	14.87	7.44	7.28	2.18
1.00	10.00	1500	13.93	13.94	13.97	9.30	9.23	0.71
2.00	10.00	1500	28.99	29.00	29.01	19.33	18.97	1.90
3.00	10.00	1000	28.87	28.97	28.81	28.88	28.71	0.60
4.00	10.00	500	19.25	19.24	19.22	38.47	38.45	0.06
5.00	10.00	500	24.03	23.93	23.98	47.96	48.19	-0.48

Offset = 0.052 LFR = 11.656 Data from file: NN_SAE
FLOW = 9.74 PW + -0.507

PRINT DATE : 07-17-1999, Test Cell 4, Head 1

ANNEXE II

SPÉCIFICATION TECHNIQUE DU THERMOCOUPLE

Thermocouple Tolerances (Reference Junction at 0°C)

American Limits of Error ASTM E230-ANSI MC 96.1

ANSI Code		Standard Limits [†]		Special Limits [†]	
J	Temp Range	>0 to 750°C	>32 to 1382°F	0 to 750°C	32 to 1382°F
	Tolerance Value	2.2°C or 0.75%	4.0°F or 0.75%	1.1°C or 0.4%	2.0°F or 0.4%
K	Temp Range	>0 to 1250°C	>32 to 2282°F	0 to 1250°C	32 to 2282°F
	Tolerance Value	2.2°C or 0.75%	4.0°F or 0.75%	1.1°C or 0.4%	2.0°F or 0.4%
	Temp. Range*	-200 to 0°C	-328 to 32°F		
T	Tolerance Value	2.2°C or 2.0%	4.0°F or 2.0%		
	Temp Range	>0 to 350°C	>32 to 662°F	0 to 350°C	32 to 662°F
	Tolerance Value	1.0°C or 0.75%	1.8°F or 0.75%	0.5°C or 0.4%	1°F or 0.4%
E	Temp. Range*	-200 to 0°C	-328 to 32°F		
	Tolerance Value	1.0°C or 1.5%	1.8°F or 1.5%		
	Temp Range	>0 to 900°C	>32 to 1652	0 to 900°C	32 to 1652°F
N	Tolerance Value	1.7°C or 0.5%	3°F or 0.5%	1.0°C or 0.4%	1.8°F or 0.4%
	Temp. Range*	-200 to 0°C	-328 to 32°F		
	Tolerance Value	1.7°C or 1.0%	3°F or 1.0%		
R S	Temp Range	>0 to 1300°C	>32 to 2372°F	0 to 1300°C	32 to 2372°F
	Tolerance Value	2.2°C or 0.75%	4.0°F or 0.75%	1.1°C or 0.4%	2.0°F or 0.4%
	Temp. Range*	-270 to 0°C	-454 to 32°F		
B	Tolerance Value	2.2°C or 2.0%	4.0°F or 2.0%		
	Temp Range	0 to 1450°C	32 to 2642°F	0 to 1450°C	32 to 2642°F
	Tolerance Value	1.5°C or 0.25%	2.7°F or 0.25%	0.6°C or 0.1%	1°F or 0.1%
G*C*D*	Temp Range	800 to 1700°C	1472 to 3092°F	Not Established	
	Tolerance Value	0.5%	0.9°F		
G*C*D*	Temp Range	0 to 2320°C	32 to 4208°F	Not Established	
	Tolerance Value	4.5°C or 1.0%	0.9°F		

* Not official symbol or standard designation † Whichever value is greater.

Note: Material is normally selected to meet tolerances above 0°C. If thermocouples are needed to meet tolerances below 0°C, the purchaser shall state this as selection of material is usually required.

ANNEXE III

SPÉCIFICATION TECHNIQUE DU CAPTEUR DE PRESSION

HOW TO ORDER PX309 SERIES RUGGED, GENERAL PURPOSE TRANSDUCERS WITH 100 mV OUTPUTS



PX309 Series
100 mV Output
0-1 to 0-10,000 psi
0-70 mbar to 0-690 bar

Starts at
\$175



- ✓ Gage or Absolute Pressure
- ✓ Low Pressure to 1 psig
- ✓ Rugged Solid State Design
- ✓ All Stainless Steel Construction
- ✓ High Stability, Low Drift
- ✓ 0.25% Accuracy Typical

100 mV Output Specifications

Excitation:

0 to 50 psig and All psia Ranges:
10 Vdc (ratiometric), (5 to 12 Vdc limits)
100 to 10,000 psig Ranges:
5 Vdc (ratiometric), (3 to 10 Vdc limits)

Output:

0 to 100 mV, except

2 psi = 40 mV and 1 psi = 20 mV

Accuracy: ±0.25% typical; includes

linearity, hysteresis and repeatability

Zero Offset: ±2% FSO;

±4% 1 and 2 psi ranges

Span Setting: ±2% FSO;

±4% 1 and 2 psi ranges

Compensated Temperature: 0 to 50°C

(-18 to 122°F)

Thermal Zero and Span Effects

(Over Compensated Range):

15 to 10,000 psi Ranges: ±2% FSO

5 psi Range: ±3% FSO

2 psi Range: ±4% FSO

1 psi Range: ±5% FSO

PX319-050GV, \$175,
mini DIN connector included,
shown smaller than actual size.

☐ NEW, LOW-PRESSURE RANGES HIGHLIGHTED

To Order (Specify Model Number)

RANGE		1.5 m CABLE		1 MINI DIN		1 TWIST-LOCK	
bar		psi/CONNECTION	PRICE	CONNECTION	PRICE	CONNECTION	PRICE
ABSOLUTE PRESSURE							
0 to 0.34	0 to 5	PX309-005AV	\$300	PX319-005AV	\$300	PX329-005AV	\$300
0 to 1	0 to 15	PX309-015AV	195	PX319-015AV	215	PX329-015AV	235
0 to 2.1	0 to 30	PX309-030AV	195	PX319-030AV	215	PX329-030AV	235
0 to 3.4	0 to 50	PX309-050AV	195	PX319-050AV	215	PX329-050AV	235
0 to 6.9	0 to 100	PX309-100AV	195	PX319-100AV	215	PX329-100AV	235
0 to 14	0 to 200	PX309-200AV	195	PX319-200AV	215	PX329-200AV	235
0 to 21	0 to 300	PX309-300AV	195	PX319-300AV	215	PX329-300AV	235
GAGE PRESSURE							
0 to 0.07	0 to 1	PX309-001GV	\$300	PX319-001GV	\$300	PX329-001GV	\$300
0 to 0.14	0 to 2	PX309-002GV	300	PX319-002GV	300	PX329-002GV	300
0 to 0.34	0 to 5	PX309-005GV	300	PX319-005GV	300	PX329-005GV	300
0 to 1	0 to 15	PX309-015GV	175	PX319-015GV	175	PX329-015GV	215
0 to 2.1	0 to 30	PX309-030GV	175	PX319-030GV	175	PX329-030GV	215
0 to 3.4	0 to 50	PX309-050GV	175	PX319-050GV	175	PX329-050GV	215
0 to 6.9	0 to 100	PX309-100GV	175	PX319-100GV	175	PX329-100GV	215
0 to 10	0 to 150	PX309-150GV	175	PX319-150GV	175	PX329-150GV	215
0 to 14	0 to 200	PX309-200GV	175	PX319-200GV	175	PX329-200GV	215
0 to 21	0 to 300	PX309-300GV	175	PX319-300GV	175	PX329-300GV	215
0 to 34	0 to 500	PX309-500GV	175	PX319-500GV	175	PX329-500GV	215
0 to 69	0 to 1000	PX309-1KGV	175	PX319-1KGV	175	PX329-1KGV	215
0 to 138	0 to 2000	PX309-2KGV	175	PX319-2KGV	175	PX329-2KGV	215
0 to 207	0 to 3000	PX309-3KGV	175	PX319-3KGV	175	PX329-3KGV	215
0 to 345	0 to 5000	PX309-5KGV	175	PX319-5KGV	175	PX329-5KGV	215
0 to 517	0 to 7500	PX309-7.5KGV	175	PX319-7.5KGV	175	PX329-7.5KGV	215
0 to 690	0 to 10,000	PX309-10KGV	175	PX319-10KGV	175	PX329-10KGV	215

Comes with certificate of conformance to specifications. **Notes:** 1. Units 100 psig and above may be subjected to vacuum on the pressure port without damage. 2. For alternative performance specifications to suit your application, contact Engineering.

Ordering Examples: PX309-100GV, 100 psi gage pressure transducer with 100 mV output @ 5 Vdc excitation and 1.5 m cable termination, \$175. PX319-015AV, 15 psi absolute pressure transducer with 100 mV output @ 10 Vdc excitation and Mini DIN termination, \$175. PX329-3KGV, 3000 psi gage pressure transducer with 100 mV output @ 5 Vdc excitation and twist-lock termination, \$215. Mating connector sold separately; order PT06V-10-6S, \$26.50. Consult Sales for OEM pricing.

ACCESSORIES

MODEL NO.	PRICE	DESCRIPTION
-NIST	\$75.00	5-point NIST-traceable calibration (must be ordered with new transducer)
CAL-3	150.00	Recalibration: 5-point NIST traceable
PT06V-10-6S	26.50	Mating connector for PX329
CA-39-4PC22-5	90.00	4-conductor mating twist-lock connector with 1.5 m (5') cable for PX329
CX5302	15.00	Extra Mini DIN connector for PX319
ES-2272	190.00	Reference Book: Handbook of Heating, Ventilation, and Air Conditioning



100 mV OUTPUT
PRESSURE TRANSDUCERS
B

ANNEXE IV

CODE MATLAB POUR ÉVAPORATION DE GOUTTELETTES

Le code présenté ci-dessous simule l'évaporation d'une gouttelette de butanol. Il peut être modifié pour simuler un autre carburant en changeant les propriétés physiques à même le code. Les conditions ambiantes sont déterminées par l'utilisateur.

```
clear all;
clc;

%-----
% PAR      : Simon Bruyère Bergeron
% DESCRIPTION : Programme itératif qui modélise l'évaporation d'une
%              gouttelette aux conditions désirées. Possibilité
%              de simuler avec présence de thermocouples.
%
% DATE      : Printemps 2011
%-----

%Propriétés de l'écoulement d'air aux conditions initiales
Ta=23+273;          %Température ambiante (K)
Ts=273+100;         %Température de soufflage (K)
Pa=101.325;         %Pression ambiante (KPa)
Va=1;              %Vitesse de l'écoulement d'air (m/s)

%Propriétés de la goutte de carburant aux conditions initiales
Tig=20+273;         %Température initiale de la goutte (K)
Dig=2.08e-3;        %Diamètre initial de la goutte (m)
mig=rho_carb*pi()*Dig^3/6; %Masse initiale de la goutte (Kg)

rho_carb=781;       %Masse volumique (Kg/m3)
Tebul=390;          %Température d'ébullition à 1atm (K)
Tcr=563;            %Température critique du carburant (K)

MM=74.122;          %Masse Molaire du carburant (Kg/Kmol)
R_carb=8.314/MM;    %Constantes des gaz du carburant (KJ/KgK)
hfg=584;            %Enthalpie de vaporisation (KJ/Kg)

%Paramètres utilisés pour calcul de la radiation
sig=5.67e-8;        %(sigma) Cste de Stephan Boltzman (W/m2k4)
eps=0.95;           %(epsilon) Emissivité de la goutte
```

```

%-----
%Initialisation de paramètres
%-----
ii=0;
dm=0;
fin=0;
Dg=Dig;
Tgf=Tig;
mg=mig;

dt=0.01;          %incrément de temps voulu (secondes)
Tm=(Ts+Tig)/2;    %Température moyenne (K)

%-----
%Début de la boucle itérative
%-----

while fin==0      %La boucle est effectuée jusqu'à ce que fin=1

ii=ii+1;
t=dt*ii;
TempsMasse=[dt*ii,(mg/mig)*100] %Sert à afficher la progression

%Adjustement des propriétés pour chaque itération
%-----
Tref=Tgf+(1/2)*(Ts-Tgf);    %Température de référence pour prop. de l'air

%Propriétés physique du carburant
Pvap=exp((-hfg/(R_carb))*(Tgf^(-1)-Tebul^(-1)))*Pa; %Clausius Clapeyron
Dab=(-0.04652+2.7162e-4*Tgf+5.8091e-7*Tgf^2)/100^2;
Cp_carb=1000*((127.21+5.2281e-1*Tgf+-1.5362e-3*Tgf^2+2.2164e-6*Tgf^3)/MM);
rho_carb=1000*0.2689*0.2667^-((1-(Tgf/Tcr))^0.2457);
k_carb=0.1871-1.1797e-5*Tgf-3.1997e-7*Tgf^2;

%Propriétés de l'air tirées du Fundamentals of heat & mass transfer
rho_air=Pa/(0.287*Tref);
mu_air=5e-8*Tref+4e-6;
Cp_air=0.052*Tref+992.1;
k_air=8e-5*Tref+0.0033;

%Calcul de Reynold, Schmidt, Sherwood, Prandtl et Nusselt
Re=rho_air*Va*Dg/mu_air;          %Nombre de Reynold
Sc=mu_air/(rho_air*Dab);          %Nombre de Schmidt

```

```

Sh=2+0.6*Re^(1/2)*Sc^(1/3);      %Nombre de Sherwood
Pr=Cp_air*mu_air/k_air;          %Nombre de Prandtl
Nu=2+0.6*Re^(1/2)*Pr^(1/3);      %Nombre de Nusselt

%Calcul des coefficients de transfert chaleur & masse
C_transchal=Nu*k_air/Dg; %Coeff de transfert de chaleur
C_transmas=Sh*Dab/Dg; %Coeff de transfert de masse

%Calcul du débit massique d'évaporation instantané - Borman et Ragland

m_point=((pi()*Dg*Dab*Pa)/(R_carb*Tref))*log((Pa)/(Pa-Pvap))*Sh;
dm=m_point*dt; %Variation de la masse instantanée

%Vérification que le modèle n'est pas sorti des bornes imposées (2)
if dm<mg

    if (mg/mig)*100>1 %Lorsque mg atteint 1% de sa masse initiale
        mg=mg-dm; %Calcul de la nouvelle masse
        Dg=((6*mg)/(pi()*rho_carb))^(1/3); %Calcul du nouveau diamètre
        Ag=pi()*Dg^2; %Calcul de la surface
    else
        mg=0;
        Dg=0;
        fin=1; %flag
        cmg=1 %flag
    end

else
    mg=0;
    Dg=0;
    fin=1; %flag
    cdm=1 %flag
end

%-----
%Partie pour l'influence de la conduction par les TC
%-----
Tgi=Tgf; %Tgi devient la température de l'itération précédente/actuelle

Ktc=36.95; %Conductivité thermique des TC(W/mK)
Dtc=0.01*25.4/1000; %Diamètre des TC (m)
Ref=rho_air*Va*Dtc/mu_air; %Reynold des TCs
%Calculs des transferts de chaleur
%-----
%Conduction

```

```

if Dtc>0

%Calcul de Coeff de transfert de chaleur pour les TC, phénomène transitoire
if Ref>40
    C=0.683;
    m=0.466;
else
    C=0.911;
    m=0.385;
end

%Équation de Hilpert, coefficient de transfert de chaleur du thermocouple
C_transfil=C*Ref^m*Pr^(1/3)*(k_air/Dtc);
%Corrélation de Walton
q_fil=2*(pi()*Dtc^2/4)*sqrt(4*Ktc*C_transfil/Dtc)*(Ts-Tgi);

else
    C_transfil=0;
    q_fil=0;
end

%Radiation (à titre indicatif, négligée dans le modèle)
q_rad=sig*Ag*eps*(Ts^4-Tgi^4);
%Convection
q_conv=C_transchal*Ag*(Ts-Tgi);
%Évaporation
q_evap=m_point*hfg*1000;
%Transfert total (Radiation + Convection + Conduction)
q_tot=q_conv+q_rad+q_fil;
%-----

%Calcul la nouvelle température, seulement si tjrs dans la boucle
if fin==0
    Tgf=((q_conv+q_fil-q_evap)/(mg*Cp_carb))*dt+Tgi;
end
Tm=(Ts+Tgf)/2; %Calcul de la nouvelle température moyenne

%-----
%Mettre les données sous forme de tableau
%-----
if fin==0 %Si toujours dans la boucle itératives
    Xb1(ii,1)=t;
    Yb1(ii,1)=Tgf;
end
end
end

```

```

%-----
%Fin de la boucle itérative
%-----
%Traitement des données et graphiques

%Données expérimentales
filename='donnée exp jean.xlsx';
But100=xlsread(filename,'Feuil1','a4:b71');
But150=xlsread(filename,'Feuil1','c4:d41');

%-----
%Création des graphiques désirés
%-----
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(Xb1(:,1),Yb1(:,1),'k-',But100(:,1),But100(:,2),'ko',...
      Xb2(:,1),Yb2(:,1),'b-',But150(:,1),But150(:,2),'bo','markersize',5)
xlabel('Temps (s)')
ylabel('Température (K)')
XLIM([0 35])
YLIM([280 400])
legend('Numérique','Expérimental','location','best')

subplot(2,1,2)
plot(Xe1(:,1),Ye1(:,1),'k-',Eth100(:,1),Eth100(:,2),'ko',...
      Xe2(:,1),Ye2(:,1),'b-',Eth150(:,1),Eth150(:,2),'bo','markersize',5)
xlabel('Temps (s)')
ylabel('Température (K)')
XLIM([0 35])
YLIM([280 400])
legend('Numérique','Expérimental','location','best')

```


ANNEXE V

ÉTUDE DE CONVERGENCE DU CODE MATLAB D'ÉVAPORATION DE GOUTTLETES

L'étude de convergence du code *Matlab* pour l'évaporation de gouttelette consiste à vérifier l'influence du pas de temps (dt) sur la valeur du temps d'évaporation. De plus, on regarde le temps que prend le modèle pour obtenir le résultat. Le tableau suivant présente les résultats de cette étude.

Résultats de l'étude de convergence

dt (s)	Temps évaporation (s)	Temps simulation (s)
0,5	30	-
0,1	29,2	-
0,05	29,2	0,3
0,01	29,13	9,2
0,005	29,12	13,9
0,001	29,11	71,9

Ce tableau montre que le temps d'évaporation ne semble plus varier au-delà d'un pas de temps de 0,01s et que le temps requis pour exécuter le code demeure raisonnable.

ANNEXE VI

CODE MATLAB POUR CALCUL DES EXPOSANTS DE LA CORRÉLATION

Le code présenté ci-dessous calcule la valeur des exposants de la corrélation utilisée pour le calcul des constantes d'amplitudes des carburants pour le régime linéaire. Le même code peut être utilisé pour le régime décroissant.

```
clear all
clc
%-----
% PAR      : Simon Bruyère Bergeron
% DESCRIPTION : Programme qui calcul et place en tableau les différentes
%              possibilités pour le calcul de l'exposant optimal d'une
%              corrélation.
%
% DATE      : Printemps 2011
%-----

%Constantes d'amplitude des carburants
C_but=32.37;
C_eth=29.41;
C_iso=32.82;
C_b50=30.83;
C_e50=30.79

%Masse volumique des carburants
rho_but=779;
rho_eth=781;
rho_iso=688;
rho_b50=733.5;
rho_e50=734.5;

%Enthalpie de vaporisation des carburants
hfg_but=494750;
hfg_eth=725690;
hfg_iso=271450;
hfg_b50=390025.8;
hfg_e50=512948.6;
```

```

%Température d'ébullition des carburants
Tebul_but=390;
Tebul_eth=350;
Tebul_iso=369;
Tebul_b50=379.5;
Tebul_e50=359.5;

%Valeur de la tolérance acceptée
tol=0.03;
ii=1;

for x=-2:0.05:2      %exposant X
for y=-2:0.05:2      %exposant Y
for z=-2:0.05:2      %exposant Z

    check(3)=0;      %Création de matrice des résultats

    %Premier test - Éthanol
    test1=(rho_eth/rho_but)^x*(hfg_eth/hfg_but)^y*(Tebul_eth/Tebul_but)^z;
    bmin1=(C_eth/C_but)*(1-tol);
    bmax1=(C_eth/C_but)*(1+tol);
    ecart1=100*abs(test1-(C_eth/C_but))/(C_eth/C_but);
    if bmin1<=test1 && test1<=bmax1
        check(1)=1;
    else
        check(1)=0;
    end

    %Deuxième test - Iso-octane
    test2=(rho_iso/rho_but)^x*(hfg_iso/hfg_but)^y*(Tebul_iso/Tebul_but)^z;
    bmin2=(C_iso/C_but)*(1-tol);
    bmax2=(C_iso/C_but)*(1+tol);
    ecart2=100*abs(test2-(C_iso/C_but))/(C_iso/C_but);
    if bmin2<=test2 && test2<=bmax2
        check(2)=1;
    else
        check(2)=0;
    end

    %Troisième test - E50
    test3=(rho_e50/rho_but)^x*(hfg_e50/hfg_but)^y*(Tebul_e50/Tebul_but)^z;
    bmin3=(C_e50/C_but)*(1-tol);
    bmax3=(C_e50/C_but)*(1+tol);
    ecart3=100*abs(test3-(C_e50/C_but))/(C_e50/C_but);

```

```
if bmin3<=test3 && test3<=bmax3
    check(3)=1;
else
    check(3)=0;
end

if check(:)==1
    possib(ii,1)=x;
    possib(ii,2)=y;
    possib(ii,3)=z;
    possib(ii,4)=ecart1;
    possib(ii,5)=ecart2;
    possib(ii,6)=ecart3;

    ii=ii+1;
end

end
end
end
```

ANNEXE VII

CODE MATLAB COURBES DE PÉNÉTRATION

```
clear all;
clc;
%-----
% PAR      : Simon Bruyère Bergeron
% DESCRIPTION : Programme itératif qui modélise la pénétration d'un jet de
%              carburant (Essence, iso-octane, butanol et éthanol).
%
% DATE      : Été 2010
%-----

%Propriétés ambiante de la chambre à injection
Tamb=300;           %Température ambiante (K)
Pamb=101.325*2.5;   %Pression ambiante (KPa)
Pinj=8e3;           %Pression d'injection(KPa)
tinj=0.002;         %Durée d'injection(s)

rho_air=(Pamb)/(0.287*Tamb); %Masse volumique de l'air (kg/m3)
DelP=(Pinj-Pamb)/1000;      %Différentiel de pression (MPa)

%Choix du carburant
%1=Essence; 2=Iso-Octane; 3=Butanol; 4=Éthanol; 5=B50; 6=E50
carb=5;

%Propriétés du carburant aux conditions initiales
if carb==1
    rho=740; %Masse volumique
    hfg=327.5; %Enthalpie de vaporisation
    Teb=398; %Température d'ébullition
elseif carb==2
    rho=688;
    hfg=271.45;
    Teb=369;
elseif carb==3
    rho=779;
    hfg=494.75;
    Teb=390;
```

```

elseif carb==4
    rho=781;
    hfg=725.69;
    Teb=351;
elseif carb==5
    rho=733.5;
    hfg=390.02;
    Teb=380;
elseif carb==6
    rho=734.5;
    hfg=512.95;
    Teb=360;
end

%Calcul des constantes d'amplitude Kcarb
Klin=32.37*(rho/779)^1.4*(hfg/494.75)^-0.25*(Teb/390)^-0.2;
Kdec=49.22*(rho/779)^1.1*(hfg/494.75)^-0.25*(Teb/390)^-0.5;

%Calcul du temps de transition
tb=(Kdec^1.5/Klin^1.5)*(DelP/rho_air)^-(0.225);
tb_affich=tb*1000

for ii=1:450
    t=(ii-1)/100;

    if t<tb
        % Portion linéaire
        S(ii,2)=Klin*(DelP/rho_air)^0.25*t;
    else
        % Portion décroissante
        S(ii,2)=(Kdec*(DelP/rho_air)^0.1*(t)^0.33);
    end

    temps(ii,1)=t;
    S(ii,1)=t;
end

```

ANNEXE VIII

PROCÉDURE D'UTILISATION DU CRITÈRE DE PEIRCE

Le critère de Peirce est basé sur l'évaluation statistique d'un ensemble de données. Son objectif est d'établir les bornes de validité de l'échantillon. Ainsi, une valeur se situant en dehors des ses limites peut être rejetée. Voici la procédure utilisée telle que définie par Ross (2003).

1. Calculer la moyenne et l'écart type de l'échantillon.
2. Obtenir la valeur du paramètre R dans le tableau de Peirce, présenté dans le travail de Ross (2003), basé sur le nombre de variables dans l'échantillon.
3. Calculer l'écart maximal permissible en multipliant la valeur de R par l'écart type.
4. Déterminer les limites de validité en soustrayant et additionnant l'écart à la moyenne.
5. Si une ou plusieurs valeurs sont rejetées, obtenir une nouvelle valeur de R, tout en conservant la moyenne et l'écart type original.
6. Répéter, au besoin, les étapes 2 à 5 jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de valeurs rejetées.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Arcoumanis C., M. Gavaises et B. French. 1997. «Effect of Fuel Injection Process on the Structure of Diesel Sprays». *SAE Paper* 970799.
- Aleiferis, P.G., J. Serras-Pereira, Z. Van Romunde, J. Caine et M. Wirth. 2010. «Mechanisms of Spray Formation and Combustion from a Multi-Hole Injector with E85 and Gasoline». *Combustion and Flame*, vol. 157, p. 735-756.
- Borman, G.L. et K.W. Ragland. 1998. *Combustion Engineering*, New York (NY) : WCB McGraw-Hill, 613 p.
- Bruno, T.J., A. Wolk et A. Naydich. 2009. «Composition-Explicit Distillation Curves for Mixtures of Gasoline with Four-Carbon Alcohols (Butanols)». *Energy & Fuels*, vol. 23, p. 2295-2306.
- Çengel, Y.A. et M.A. Boles. 2002. *Thermodynamics an Engineering Approach*, 4th ed. New York (NY) : McGraw-Hill, 930 p.
- Çengel, Y.A. et J.M. Cimbala. 2006. *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*, New York (NY) : McGraw-Hill, 956 p.
- Chao, H., G. Yunshan, T. Jianwei et H. Xiukun. 2008. «Spray Properties of Alternative Fuels: A Comparative Analysis of Biodiesel and Diesel». *International Journal of Energy Research*, vol. 32, p. 1329-1338.
- Delacourt, E., B. Desmet et B. Besson. 2005. «Characterisation of Very High Pressure Diesel Sprays Using Digital Imaging Techniques». *Fuel*, vol. 84, p. 859-867.
- Desantes, J.M., R. Payri, F.J. Salvador et A. Gil. 2006. «Development and Validation of a Theoretical Model for Diesel Spray Penetration». *Fuel*, Vol. 85, p. 910-917.

deVries, J., W.B. Lowry, Z. Serinyel, H.J. Curran et E.L. Peterson. 2011. «Laminar Flame Speed Measurements of Dimethyl Ether in Air at Pressures Up to 10atm». *Fuel*, vol. 90, p.331-338.

Fluent Inc. 2006. *Fluent 6.3*. Liban. PDF.

Gao, J., D. Jiang, et Z. Huang. 2007. «Spray Properties of Alternative Fuels : A Comparative Analysis of Ethanol-Gasoline Blends and Gasoline». *Fuel*, vol. 86, p. 1645-1650.

Heywood, J.B.. 1988. *Internal Combustion Engine Fundamentals*, New York (NY) : McGraw-Hill Publishing Company, 930 p.

Hiroyasu, H., T. Kadota et M. Arai. 1980. «Supplementary Comments : Fuel Spray Characterization in Diesel Engines». *Plenum Press*, p. 369-408.

Incropera, F.P., D.P. Dewitt, T.L. Bergman et A.S. Lavine. 2007. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed. Hoboken (NJ) : John Wiley & Sons, 997 p.

Jasuja, A.K. et A.H. Lefebvre. 1994. «Influence of Ambient Pressure on Drop-Size and Velocity Distributions on Dense Sprays». In *Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion/The Combustion institute*. (Irvine (CA), July 31-Aug. 5 1994), p. 345-352. Pittsburgh (PA) : Combustion Institute.

Kim, H. et N. Sung. 2003. «The Effect of Ambient Pressure on the Evaporation of a Single Droplet and a Spray». *Combustion and Flame*, vol. 135, p. 261-270.

Kostas, J., D. Honnery et J. Soria. 2009. «Time Resolved Measurements of the Initial Stages of Fuel Spray Penetration». *Fuel*, vol. 88, p. 2225-2237.

Lee, T.-W.. 2008. *Thermal and Flow Measurements*, Boca Raton (Fla) : Taylor & Francis Group/CRC Press, 390 p.

Lee, S.H., D. Tanaka, J. Kusaka et Y. Daisho. 2002. «Effects of Diesel Fuel Characteristics on Spray and Combustion in a Diesel Engine». *Society of Automotive Engineers of Japan*, vol. 23, p.407-404.

- Lefebvre, A.H.. 1995. *Atomization and Sprays*, «Combustion: An International Series». New York (NY): Taylor & Francis Group/CRC Press, 434 p.
- Moffat, R.J.. 1988. «Describing the Uncertainties in Experimental Results». *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 1, p.3-17.
- Munson, B.R., D.F. Young et T.H. Okiishi. 2006. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. Singapore : John Wiley & Sons, 789 p.
- O'Rourke, P.J. et A.A. Amsden. 1987. «The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup». *SAE Paper* 872089.
- Panton, R.L.. 2005. *Incompressible Flow*, 3rd ed. Hoboken (NJ) : John Wiley & Sons, 821 p.
- Park, S.H., H.J. Kim, H.K. Suh et C.H. Lee. 2009. «Atomization and Spray Characteristics of Bioethanol and Bioethanol Blended Gasoline Fuel Injected Through a Direct Injection Gasoline Injector». *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 30, p. 1183-1192.
- Pielecha, I., K. Wislocki, J. Czajka et D. Maslennikov. 2010. «The Qualitative Spray Characteristics of High-Pressure Gasoline Injection System». In *23rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*. (Brno (Czech Republic), Sep. 2010), p. 1-10. Poznan.
- Ranz, W.E. et Jr W.R. Marshall. 1952. «Evaporation from Drops». *Chemical Engineering Progress*, Vol. 48, n°4, p. 173-180.
- Reitz , R.D.. 1987. «Modeling Atomization Processes in High Pressure Vaporizing Sprays». *Atomization and Spray Technology*, Vol. 3, p.309-337.
- Reitz, R.D. et R. Diwakar. 1986. «Effect of Drop Breakup on Fuel Sprays». *SAE Paper* 860469.
- Roisman, I.V., L. Araneo et C. Tropea. 2007. «Effect of Ambient Pressure on Penetration of a Diesel Spray». *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 33, p. 904-920.

- Rotondi, R. et G. Bella. 2006. «Gasoline Direct Injection Spray Simulation». *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 45, p. 168-179.
- Ross, S.M.. 2003. «Peirce's Criterion for the Elimination of Suspect Experimental Data». *Journal of Engineering Technology*, p. 1-12.
- Sazhin, S., C. Crua, D. Kennaird et M. Heikal. 2003. «The Initial Stage of Fuel Spray Penetration». *Fuel*, vol. 82, p. 875-885.
- Seers, P.. 2009. *Biocarburants et Combustion*. Notes du cours : ENR-820. Montréal: École de Technologie Supérieure.
- Seers, P., W. Thomas et S.B. Bergeron. 2010. «Determination of Fuel Droplet Evaporation Based on Multiple Thermocouple Sizes». In *Forty-Ninth AIAA Aerospace Sciences Meeting*. (Orlando (FL), Jan. 3-7 2011), p. 1-7. Montréal.
- Star-CD. 2010. *Star-CD v4.14*. CD adapco. PDF
- Stiesch, G.. 2003. *Modeling Engine Spray and Combustion Processes*, «Heat and Mass Transfer», Allemagne: Springer, 282 p.
- Suh, H.K., H.G. Roh et C.S. Lee. 2008. «Spray and Combustion Characteristics of Biodiesel/Diesel Blended Fuel in a Direct injection Common-Rail Diesel Engine». *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 130, p.1-9.
- Taylor, G.I.. 1963. «The Instabilities of Liquid Surfaces when Accelerated in a Direction Perpendicular to their Plane». *Batchelor GK, The Scientific Papers of G.I. Taylor*, Vol. 3, p.457-464.
- Vanderwege, B.A. et S. Hochgreb. 1998. «The Effect of Fuel Volatility on Sprays from High-Pressure Swirl Injectors». In *Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion/The Combustion institute*. (Boulder (CO), Aug. 2-7 1998), p. 2525-2533. Pittsburgh (PA): Combustion Institute.

- Walton, D.E.. 2004. «The Evaporation of Water Droplets. A Single Droplet Drying Experiment». *Drying Technology*, Vol. 22, no.3, p. 431-456.
- Yaws, C.L.. 2003. «The Yaws Handbook of Thermodynamic Properties for Hydrocarbon and Chemicals». En ligne. <http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=667&VerticalID=0>. consulté en mai 2009.
- Zhao, F., M.-C. Lai et D.L. Harrington. 1999. «Automotive Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engines». *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 25, p. 437-562.
- Zigan, L., I. Schmitz, A. Flügel, M. Wensing et A. Leipertz. 2011. «Structure of Evaporating Single and Multicomponent Fuel Spray for 2nd Generation Gasoline Direct Injection». *Fuel*, vol. 90, p. 348-363.