



Caractérisation hydraulique des buses

**Projet : Evaluation et optimisation modèles
STARCD d'écoulement dans la buse et de jet
diesel**

Date: 28 avril 2008.



1- Introduction

Cette partie de l'étude a permis de caractériser le comportement hydraulique de deux séries de buses, cavitantes et non cavitantes. Les essais ont été divisés en deux séries :

Points Emphase :

- Buses Emphase conique et cylindrique.
- Pression rail de 800 et 1500 bars.
- Contre-pression de 10 et 50 bars.
- 3 pulses électriques 500, 1000 et 200+500 μ s.

Points Etude de compréhension / amélioration modèles CFD :

- Buses Emphase conique et cylindrique + buses monotrou conique et cylindrique.
- Pulse long de 4000 μ s.
- Double balayage de ΔP (Reynolds) et de contre-pression (KN) à ΔP constant.
 - $\Delta P = 300, 700$ et 1400 bars.
 - CP de 10 à 100 bars (avec des essais jusqu'à 180 bars pour les mesures de débit). Les balayages de CP sont réduits pour les buses coniques (sans cavitation) et beaucoup plus amples pour les buses cylindriques cavitantes.
- Balayage de Prail pour une CP de 60 bars pour caractériser l'écoulement dans les conditions d'essais du moteur optique (buses cylindriques cavitantes).

2- Metodologie experimental

2-1- Mesure du taux d'introduction

Le débit massique se mesure au moyen du « Injection rate curve indicator » (EVI2), schématisé sur la figure 1. Cet appareil se base sur le principe de la méthode Bosch, qui consiste à la propagation d'ondes de pression dans une colonne de liquide.

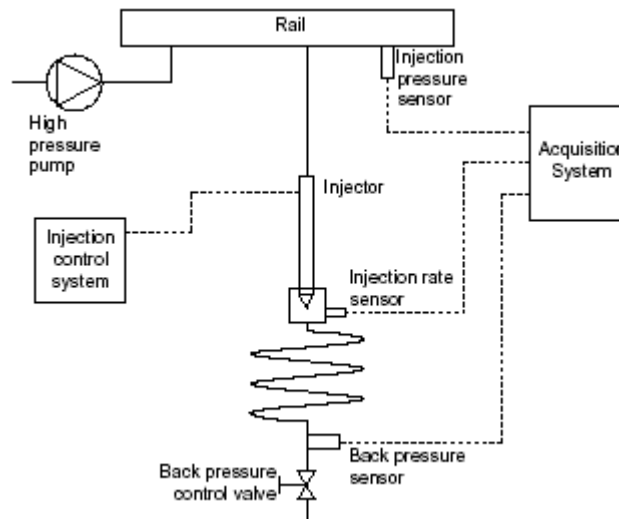


Figure 1.-Mesure de débit massique.

2-2- Mesure de la quantité de mouvement

L'objectif principal de cet appareil est la mesure de la force d'impact du jet, laquelle est proportionnelle à la quantité de mouvement à la sortie du trou. La figure 2 illustre un schéma de la maquette utilisée. A noter que la chambre peut être pressurisée avec du N_2 jusqu'à une pression de 100 bars, simulant les conditions de contre pression atteintes dans un moteur.

La force se mesure au moyen d'un capteur piézo-électrique, situé à 5 mm de la sortie du trou, calibré pour mesurer directement la force et avec une surface suffisamment grande pour recevoir tout le jet.

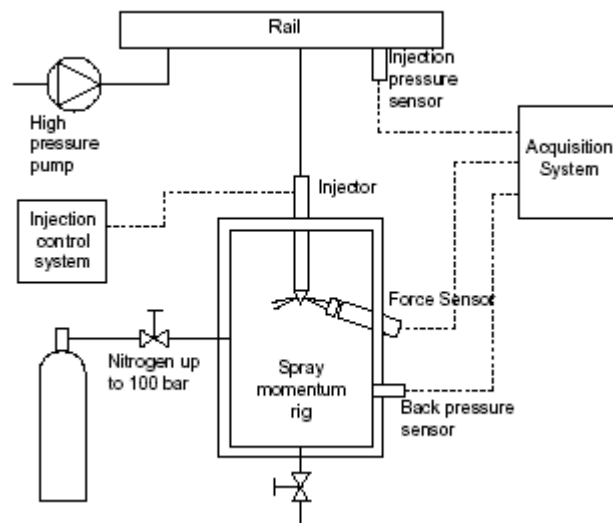


Figure 2.-Maquette de quantité de mouvement.

2-2- Mesure de la quantité de mouvement

La géométrie des orifices est obtenue à partir de moulages silicone analysés postérieurement sur microscope électronique.

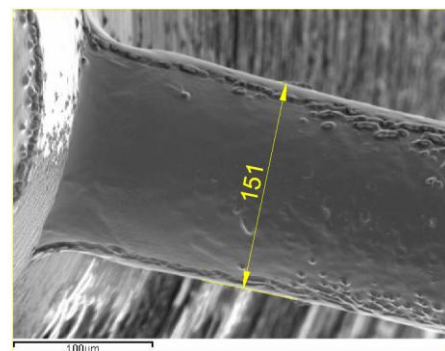
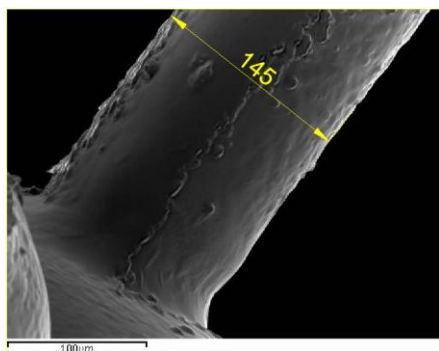


Figure 3.-Exemple des résultats obtenus pour la buse Emphase cylindrique.



3- Caractéristiques des buses

	Nombre de trous	Diamètre de sortie [μm]	Conicité Kf
Buse Emphase conique (Ks=1.5)	6	138	1.7
Buse Emphase cylindrique (Kf=0)	6	147	0.1
Buse mono-trou conique	1	165	1.1
Buse mono-trou cylindrique	1	163	-0.6

4- Points de fonctionnement Emphase

Le plan d'essais correspondant aux points de fonctionnement du programme Emphase est le suivant :

Buse	ΔP (bar)	Prail (bar)	CP (bar)	Pulse de commande (μs)
Emphase Conique	790	800	10	500
Emphase Conique	790	800	10	1000
Emphase Conique	790	800	10	200+500
Emphase Conique	750	800	50	500
Emphase Conique	750	800	50	1000
Emphase Conique	750	800	50	200+500
Emphase Conique	1490	1500	10	500
Emphase Conique	1490	1500	10	1000
Emphase Conique	1490	1500	10	200+500
Emphase Conique	1450	1500	50	500
Emphase Conique	1450	1500	50	1000
Emphase Conique	1450	1500	50	200+500

Buse	ΔP (bar)	Prail (bar)	CP (bar)	Pulse de commande (μs)
Emphase Cylindrique	790	800	10	500
Emphase Cylindrique	790	800	10	1000
Emphase Cylindrique	790	800	10	200+500
Emphase Cylindrique	750	800	50	500
Emphase Cylindrique	750	800	50	1000
Emphase Cylindrique	750	800	50	200+500
Emphase Cylindrique	1490	1500	10	500
Emphase Cylindrique	1490	1500	10	1000
Emphase Cylindrique	1490	1500	10	200+500
Emphase Cylindrique	1450	1500	50	500
Emphase Cylindrique	1450	1500	50	1000
Emphase Cylindrique	1450	1500	50	200+500

Les résultats des mesures de taux d'introduction et de quantité de mouvement sont présentés en annexe. Pour ces points Emphase – principalement pour les cas 500 et 200+500 μs – le comportement de l'injecteur est très sensible. Les durées d'injection obtenues pour une même durée de pulse électrique ne sont pas répétitives entre les mesures de débit massique et celles de quantité de mouvement. Dans ces conditions, la détermination de la vitesse d'injection (quotient quantité de mouvement / débit massique) est délicate.

4- Essais en conditions quasi-stationnaires

L'objectif de ces essais est d'obtenir une base de données complète du comportement des quatre buses analysées en fonction des deux principaux paramètres contrôlant l'écoulement : le nombre de Reynolds et le nombre caractéristique de cavitation KN. Pour cela, un double balayage a été réalisé :

- 3 niveaux de ΔP (et donc de Re).
- Pour chaque ΔP , balayage de la contre-pression (et donc de KN).

Le plan d'essais ainsi que les valeurs des débits massiques et des quantités de mouvements mesurés à pleine levée d'aiguille sont résumés dans les tables suivantes.

Buse	ΔP (bar)	Prail (bar)	CP (bar)	mf/trou (kg/s)	Mf/trou (N)
Monotrou Conique	300	310	10	3.53E-03	0.811
Monotrou Conique	300	360	60	3.62E-03	0.833
Monotrou Conique	300	400	100	3.58E-03	0.843
Monotrou Conique	700	710	10	5.35E-03	1.925
Monotrou Conique	700	760	60	5.47E-03	1.992
Monotrou Conique	700	800	100	5.49E-03	2.006
Monotrou Conique	1400	1410	10	7.22E-03	3.791
Monotrou Conique	1400	1460	60	7.69E-03	3.906
Monotrou Conique	1400	1500	100	7.71E-03	3.96

Buse	ΔP (bar)	Prail (bar)	CP (bar)	mf/trou (kg/s)	Mf/trou (N)
Monotrou Cylindrique	300	310	10	2.93E-03	0.635
Monotrou Cylindrique	300	360	60	3.12E-03	0.657
Monotrou Cylindrique	300	400	100	3.27E-03	0.691
Monotrou Cylindrique	400	410	10	3.31E-03	0.837
Monotrou Cylindrique	400	460	60	3.51E-03	0.870
Monotrou Cylindrique	400	500	100	3.72E-03	0.888
Monotrou Cylindrique	500	510	10	3.63E-03	1.049
Monotrou Cylindrique	500	560	60	3.86E-03	1.074
Monotrou Cylindrique	500	600	100	4.08E-03	1.101
Monotrou Cylindrique	700	710	10	4.29E-03	1.450
Monotrou Cylindrique	700	760	60	4.52E-03	1.496
Monotrou Cylindrique	700	800	100	4.68E-03	1.550
Monotrou Cylindrique	900	910	10	4.80E-03	1.872
Monotrou Cylindrique	900	960	60	5.08E-03	1.903
Monotrou Cylindrique	900	1000	100	5.20E-03	1.966



Monotrou Cylindrique	1400	1410	10	5.95E-03	2.902
Monotrou Cylindrique	1400	1460	60	6.29E-03	3.002
Monotrou Cylindrique	1400	1500	100	6.42E-03	3.050

Buse	ΔP (bar)	Prail (bar)	CP (bar)	mf/trou (kg/s)	Mf/trou (N)
Emphase Conique	300	310	10	2.55E-03	0.498
Emphase Conique	300	400	100	2.61E-03	0.504
Emphase Conique	700	710	10	4.21E-03	1.381
Emphase Conique	700	800	100	4.27E-03	1.401
Emphase Conique	1400	1410	10	6.26E-03	2.960
Emphase Conique	1400	1500	100	6.35E-03	3.049

Buse	ΔP (bar)	Prail (bar)	CP (bar)	mf/trou (kg/s)	Mf/trou (N)
Emphase Cylindrique	300	310	10*	2.60E-03	-
Emphase Cylindrique	300	320	20	2.61E-03	0.455
Emphase Cylindrique	300	330	30	2.62E-03	0.465
Emphase Cylindrique	300	340	40	2.64E-03	0.467
Emphase Cylindrique	300	350	50	2.66E-03	0.462
Emphase Cylindrique	300	370	70	2.69E-03	0.461
Emphase Cylindrique	300	380	80	2.69E-03	0.464
Emphase Cylindrique	300	400	100	2.69E-03	0.463
Emphase Cylindrique	700	710	10	4.12E-03	1.222
Emphase Cylindrique	700	720	20	4.14E-03	1.228
Emphase Cylindrique	700	740	40	4.24E-03	1.257
Emphase Cylindrique	700	750	50	4.26E-03	1.256
Emphase Cylindrique	700	770	70	4.34E-03	1.273
Emphase Cylindrique	700	780	80	4.36E-03	1.282
Emphase Cylindrique	700	800	100	4.38E-03	1.272
Emphase Cylindrique	1400	1410	10	5.93E-03	2.638
Emphase Cylindrique	1400	1420	20	6.02E-03	2.650
Emphase Cylindrique	1400	1450	50	6.06E-03	2.702
Emphase Cylindrique	1400	1460	60	6.07E-03	2.707
Emphase Cylindrique	1400	1470	70	6.08E-03	2.687
Emphase Cylindrique	1400	1480	80	6.09E-03	2.700
Emphase Cylindrique	1400	1500	100	6.15E-03	2.711
Emphase Cylindrique	300	360	60	2.65E-03	0.472
Emphase Cylindrique	400	460	60	3.12E-03	0.670
Emphase Cylindrique	500	560	60	3.54E-03	0.875
Emphase Cylindrique	600	660	60	3.90E-03	1.059

Emphase Cylindrique	800	860	60	4.54E-03	1.478
Emphase Cylindrique	900	960	60	4.85E-03	1.688
Emphase Cylindrique	1000	1060	60	5.11E-03	1.892
Emphase Cylindrique	1100	1160	60	5.39E-03	2.099
Emphase Cylindrique	1200	1260	60	5.66E-03	2.300
Emphase Cylindrique	1300	1360	60	5.87E-03	2.507
Emphase Cylindrique	1400	1460	60	6.13E-03	2.701
Emphase Cylindrique	1500	1560	60	6.46E-03	2.905

Les paramètres C_d , C_M et C_o ont été définis pour analyser ces résultats.

$$U_{Bernoulli} = \sqrt{\frac{2 * \Delta P}{\rho_{liq}}}$$

$$\dot{m}_f = \iint_{A_0} (U * \rho) * dA = A_o * \rho_{liq} * (C_d * U_{Bernoulli})$$

$$\dot{M}_f = \iint_{A_0} (U^2 * \rho) * dA = A_o * \rho_{liq} * (C_M * U_{Bernoulli})^2$$

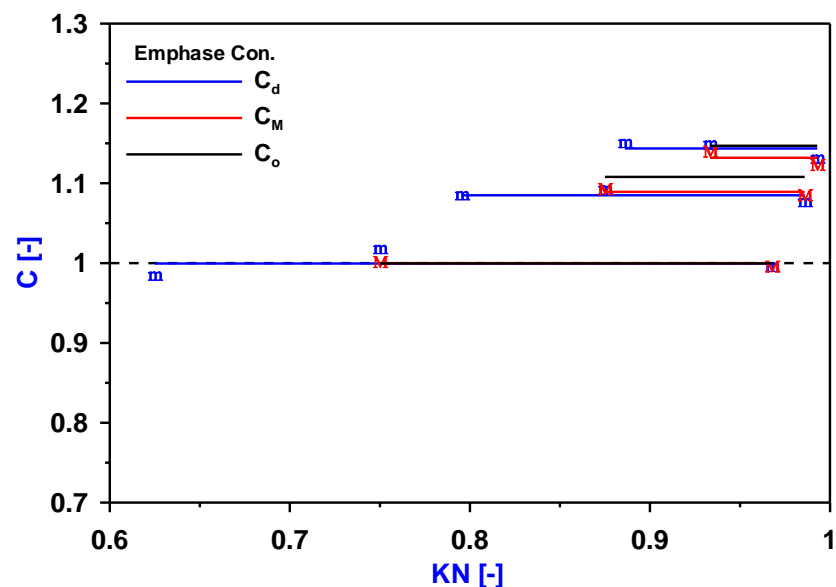
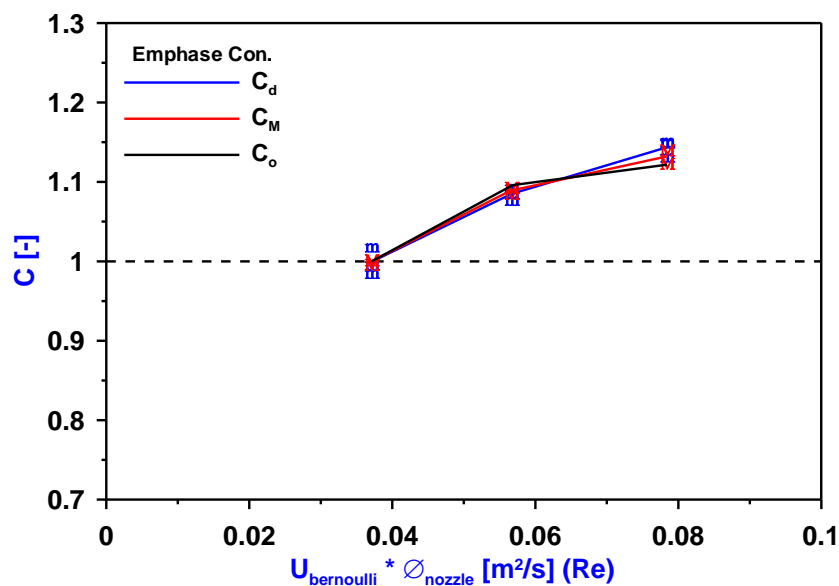
$$U_o = \frac{\dot{M}_f}{\dot{m}_f} = \frac{\int_{A_0} (U^2 * \rho) * dA}{\int_{A_0} (U * \rho) * dA} = C_o * U_{Bernoulli} \quad \text{c'est à dire} \quad C_o = \frac{C_M^2}{C_d}$$

Ces trois paramètres de l'écoulement C_d , C_M et C_o sont caractéristiques du débit massique (produit $(U * \rho)$), du flux de quantité de mouvement (produit $(U^2 * \rho)$) et de la vitesse d'injection.

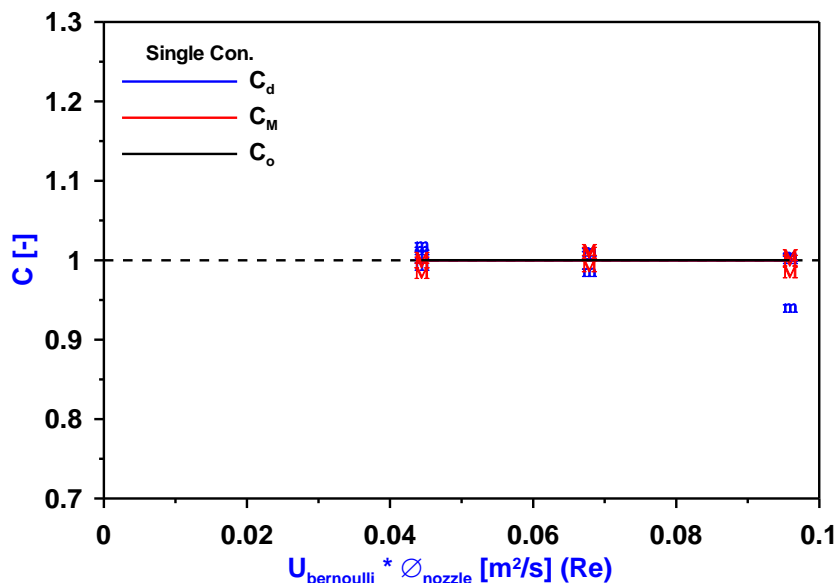
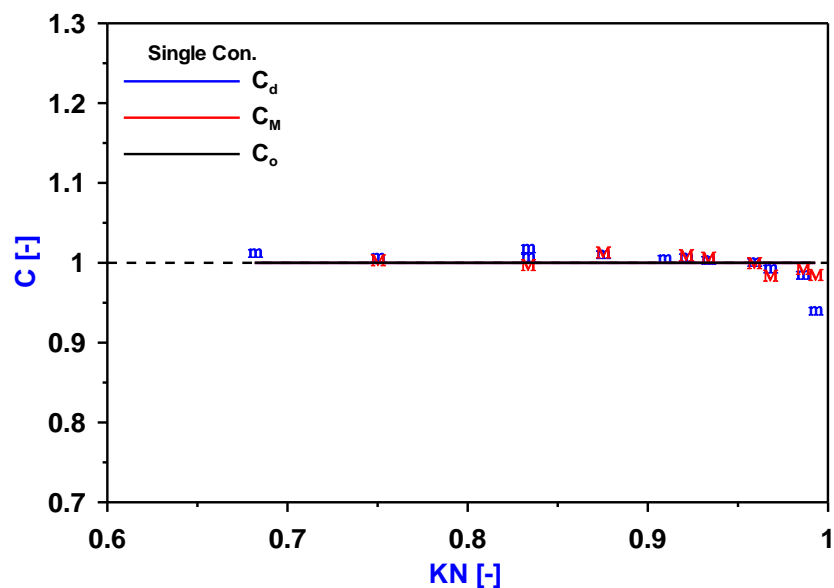
Afin de faciliter l'analyse, les résultats ont été présentés graphiquement comme variations relatives par rapport aux conditions non cavitantes correspondant aux ponts de fonctionnement de $\Delta P=300$ bars.

4-1- Buses non cavitantes

Pour la buse 6 trous Emphase conique, on observe un comportement classique avec une nette augmentation du paramètre lié au débit massique C_d lorsque ΔP (et donc Re) augmente. Comme il n'y a pas de cavitation, les paramètres C_M et C_0 liés à la quantité de mouvement et à la vitesse d'injection se comportent de manière similaire. De plus, on confirme que, sans cavitation, l'écoulement est insensible aux variations du paramètre de cavitation KN .



Contrairement à ce qui se passe pour une buse multi-trous classique, le paramètre de débit C_d de la buse mono-orifice conique ne varie quasiment pas en fonction de ΔP (et donc de Re). Ceci alors que les valeurs de Re sont similaires à celles de la buse Emphase. Ce comportement a déjà été observé sur des buses mono-trou (voir par exemple « Soteriou, C., Smith, M., Andrews, R., "Direct Injection Diesel Sprays and the Effects of Cavitation and Hydraulic Flip on Atomization", SAE Paper 950080 »). Les paramètres C_M et C_0 liés à la quantité de mouvement et à la vitesse d'injection se comportent de manière similaire et sont insensibles aux variations de Re et de KN .

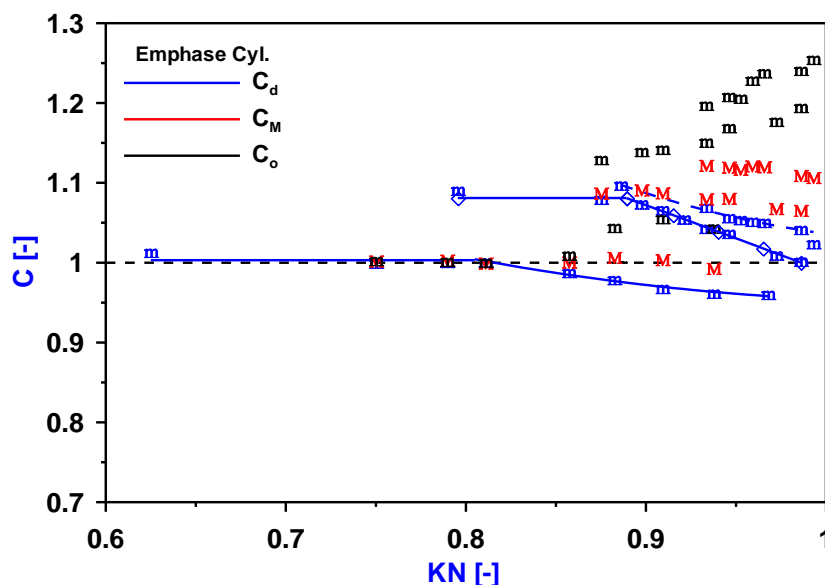
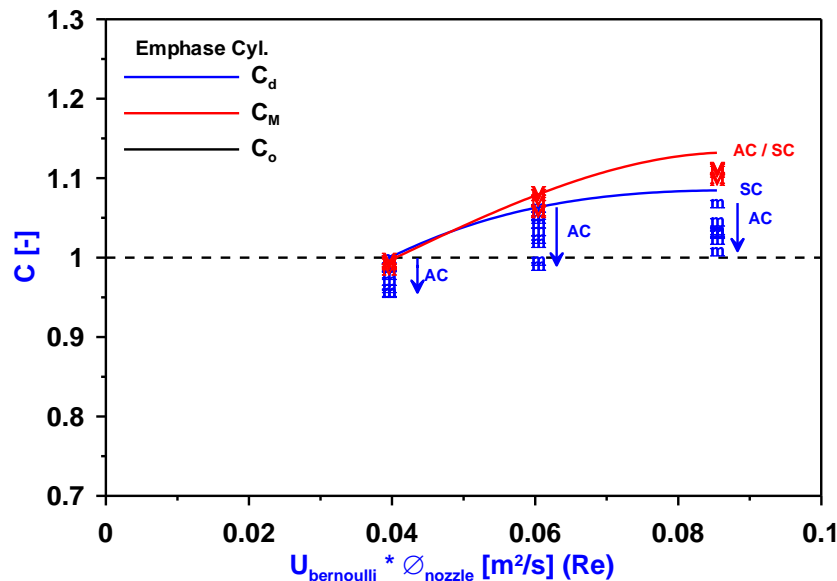


Remarque : la buse mono-trou conique, en raison de son K_f relativement faible, commence à caviter dans les conditions de KN les plus élevées (1410 bar / 10 bar).

4-2- Buses cavitantes

Dans les conditions non cavitantes (KN faibles) le comportement de la buse Emphase cylindrique est totalement classique et similaire à celui de la buse Emphase conique :

- Evolution des paramètres C_d , C_M et C_0 en fonction de ΔP (et donc de Re).
- Valeurs constantes de C_d , C_M et C_0 en fonction de KN (si KN est inférieur à $KN_{critique}$).

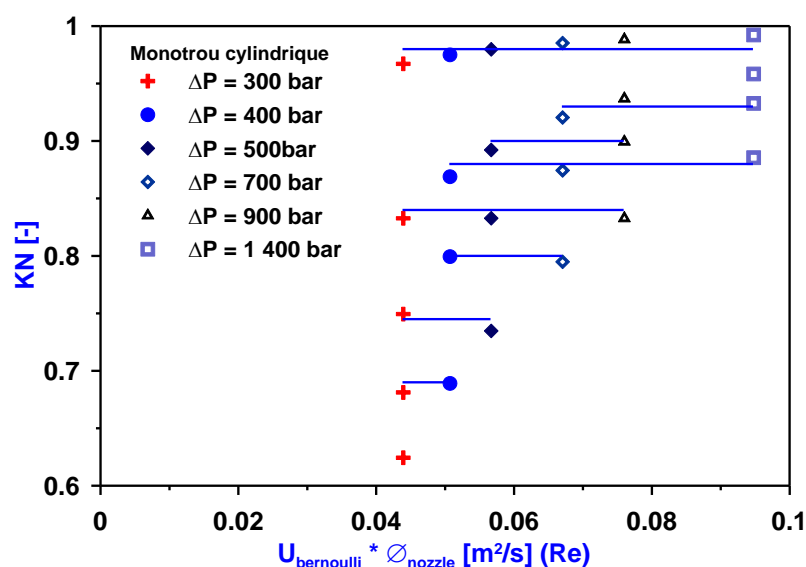
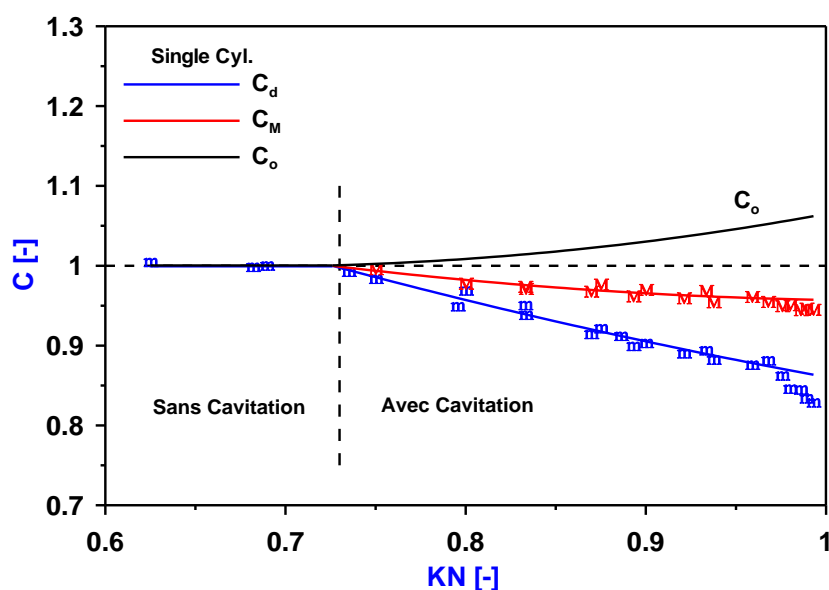


Dès que la cavitation commence, elle se traduit par :

- Une réduction classique du débit massique due à la baisse de la densité du carburant.
- Une légère réduction (beaucoup moins importante que pour le débit massique) du flux de quantité de mouvement. Ces résultats traduisent une augmentation significative du paramètre lié à la vitesse d'injection U_0 .

Le comportement de la buse mono-trou cylindrique suit la même tendance que celui de la buse mono-trou conique : les paramètres caractéristiques du débit et de la quantité de mouvement semblent totalement insensibles aux variations de ΔP (et donc de Re).

Lorsque la buse commence à caviter, la quantité de mouvement décroît plus fortement comparé avec les buses multi-trous (comme la buse Emphase). Néanmoins, la chute de la quantité de mouvement est certes moindre que celle du débit mais elle est significative. Cette réduction de la quantité de mouvement traduit une augmentation de la vitesse d'injection plus faible que pour les buses multi-trous.



5- Conclusion

Les buses Emphases suivent le comportement classique des buses déjà caractérisées par CMT :

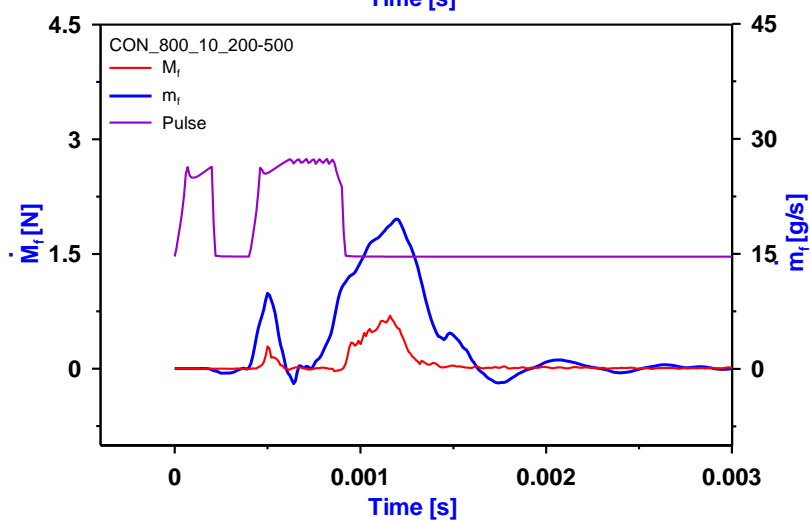
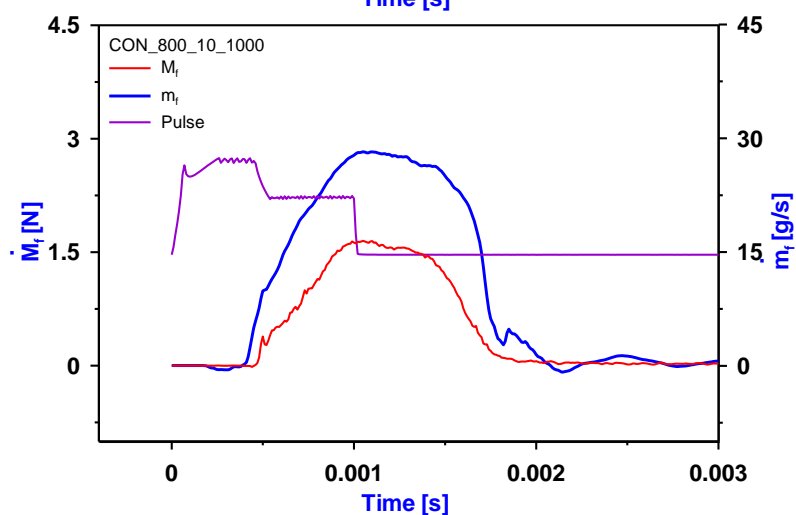
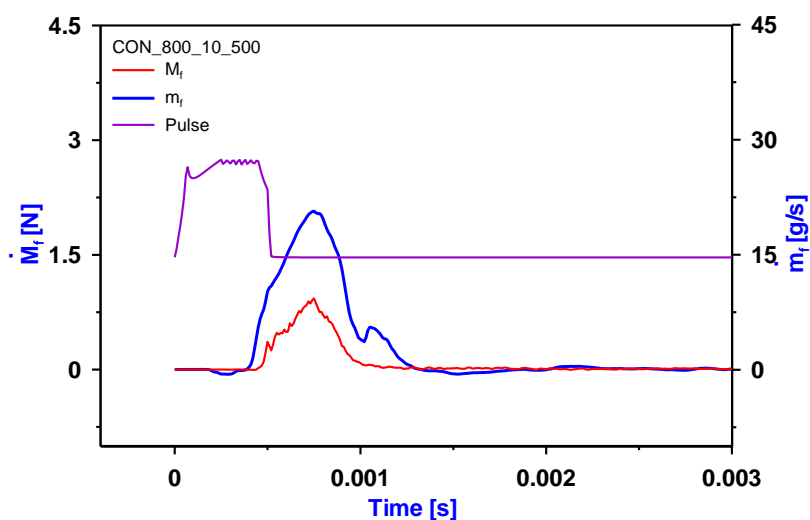
- Les paramètres caractéristiques de l'écoulement sont fonction de Re , qu'il y ait cavitation ou non.
- Lorsqu'il n'y a pas de cavitation, l'écoulement est insensible aux variations du paramètre KN .
- L'apparition de cavitation se traduit par :
 - Une réduction du débit massique (C_d).
 - Une réduction (plus légère que pour le C_d) de la quantité de mouvement (C_M).
 - Une augmentation de la vitesse d'injection (C_0).

Les buses mono-trou ont un comportement relativement différent, avec une insensibilité quasiment totale aux variations de ΔP (et donc de Re). De plus, l'apparition de la cavitation s'accompagne d'une réduction plus forte de la quantité de mouvement. Ceci traduit une augmentation de la vitesse d'injection moindre que celle habituellement observée pour des buses multi-trous.

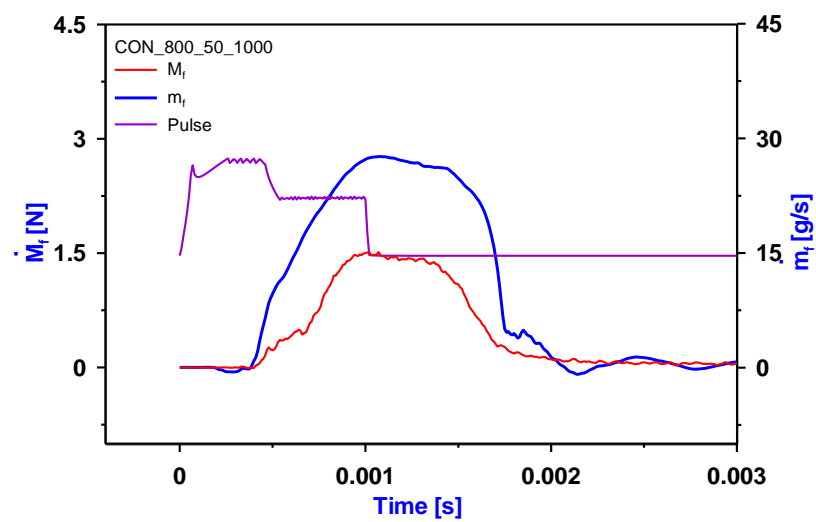
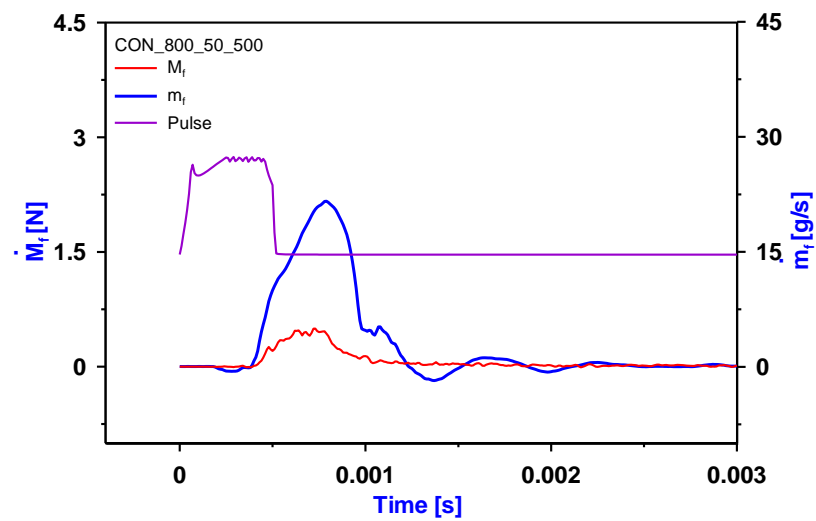
Etant donné l'objectif principal de ces essais expérimentaux qui est l'amélioration et la validation des calculs CFD de l'écoulement dans les buses, ce double comportement est très intéressant, en particulier pour valider le modèle de turbulence utilisé.

Anexe – Résultats des points de fonctionnement Emphase

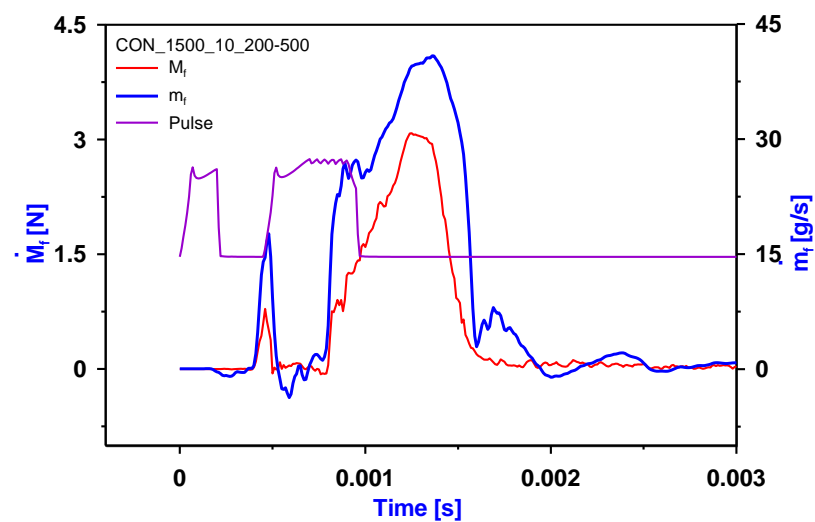
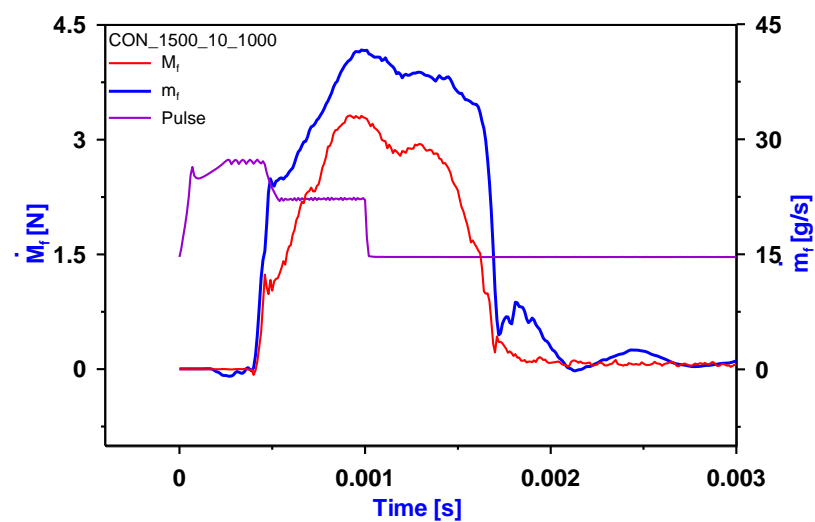
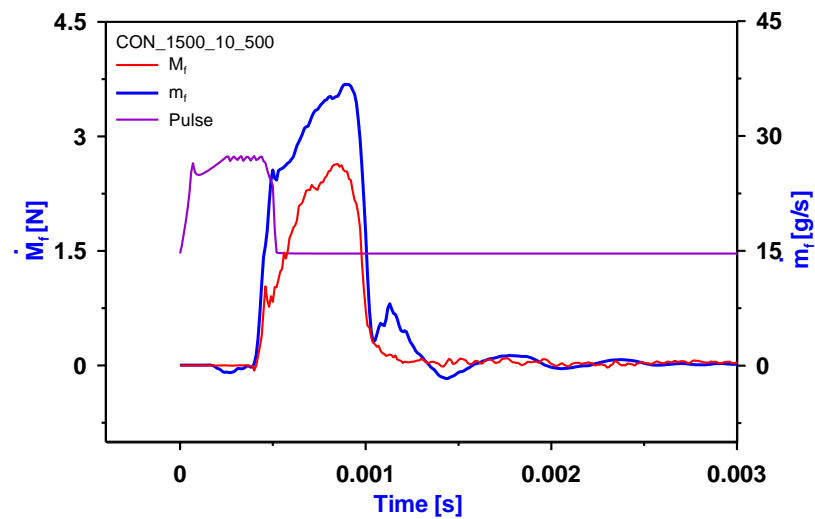
Emphase conique - Pression rail: 800bar, Contrepression: 10bar



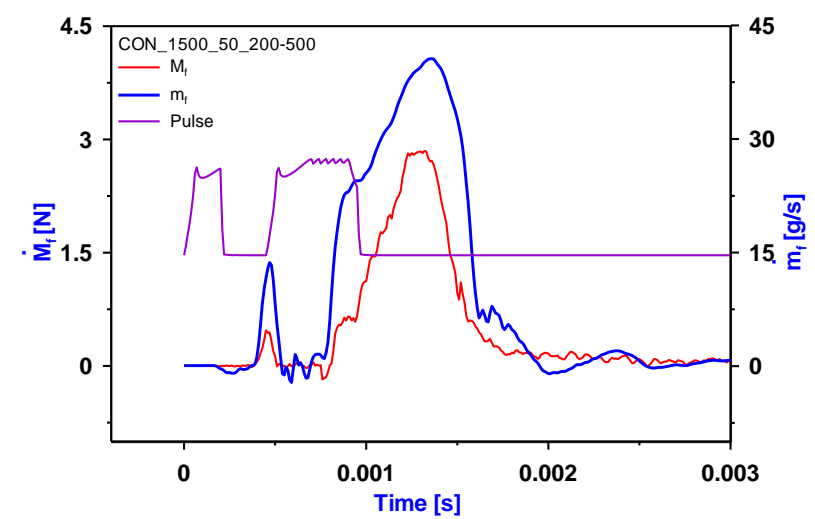
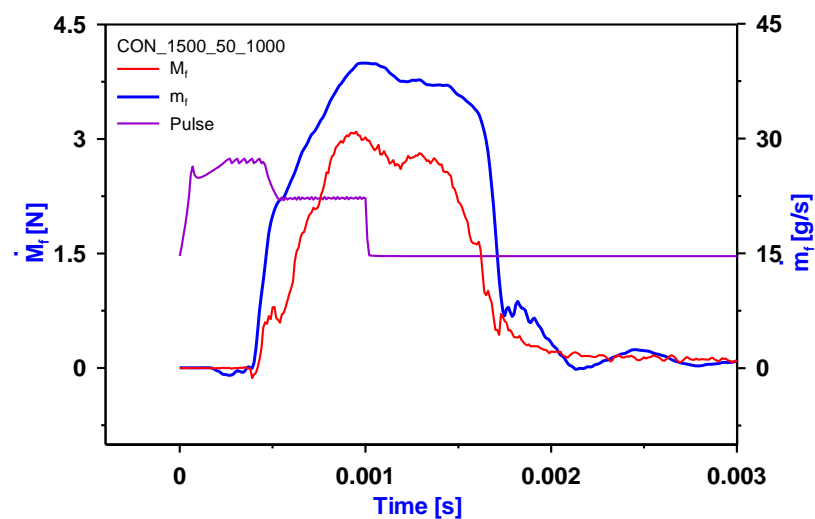
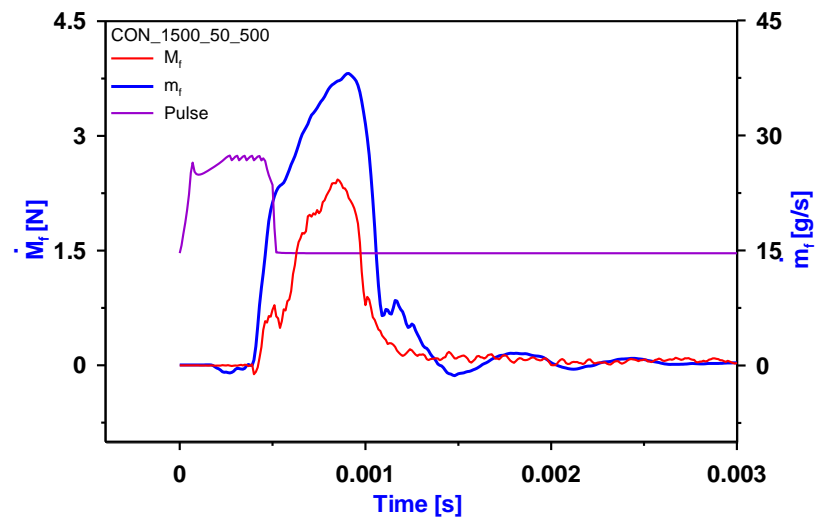
Emphase conique - Pression rail: 800bar, Contrepression: 50bar



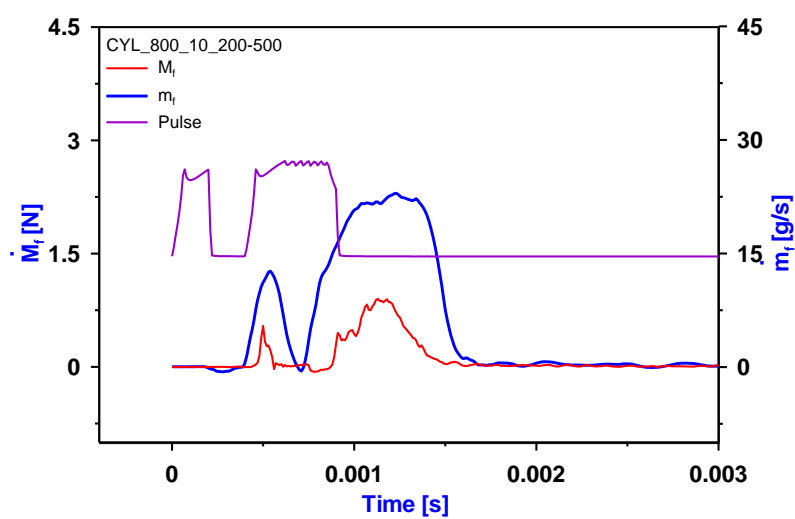
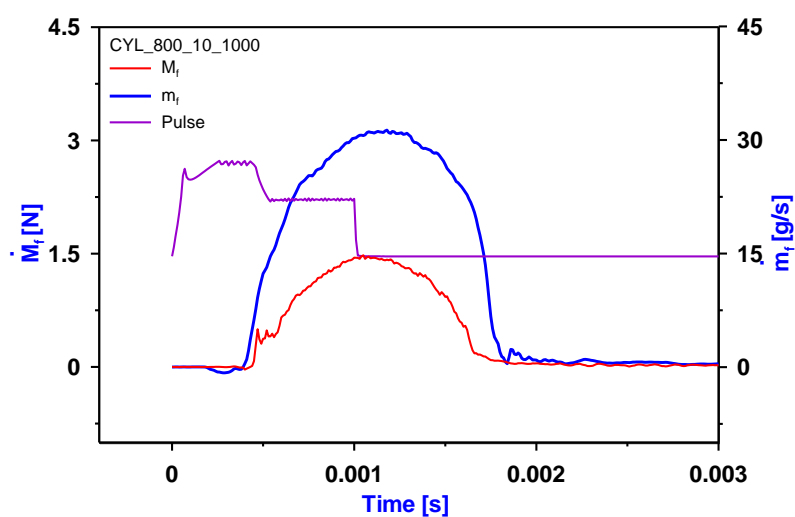
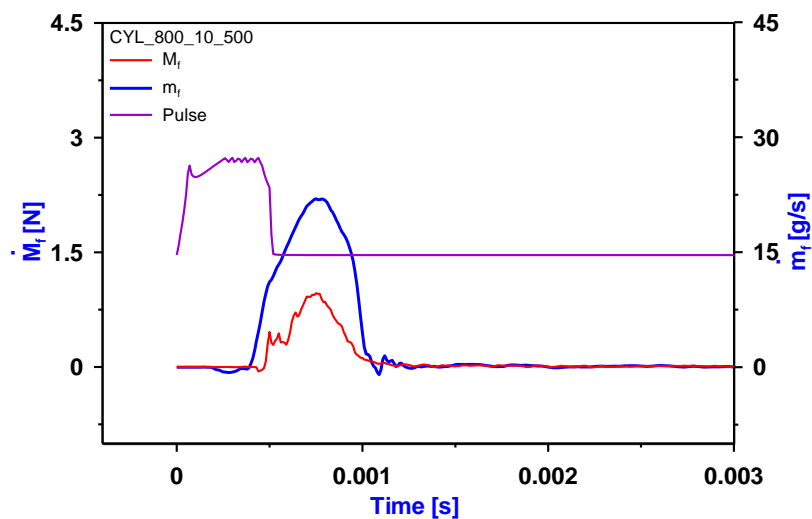
Emphase conique - Pression rail: 1500bar, Contrepression: 10bar



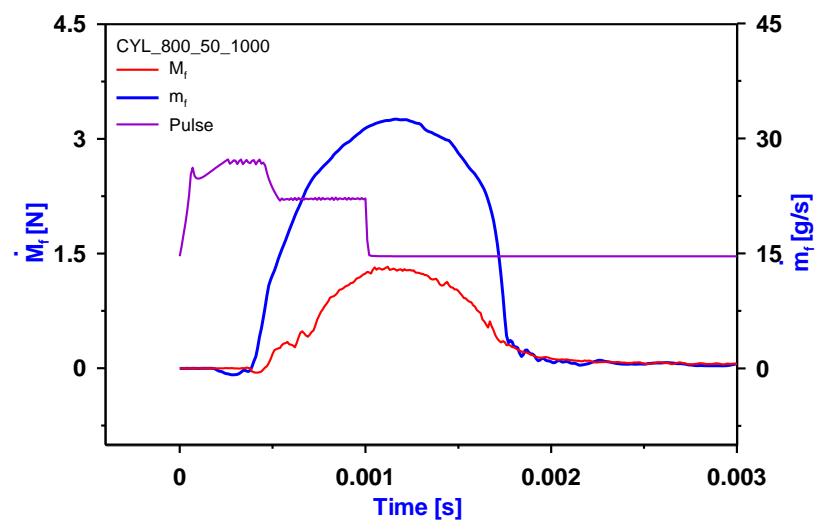
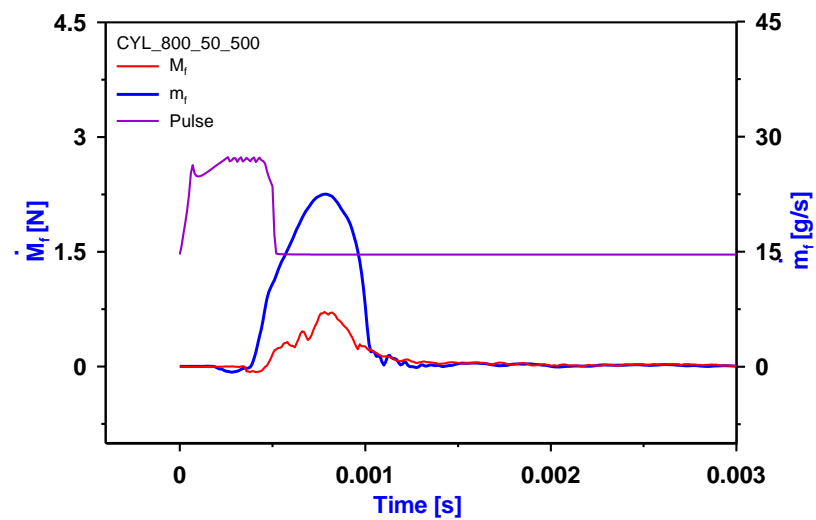
Emphase conique - Pression rail: 1500bar, Contrepression: 50bar



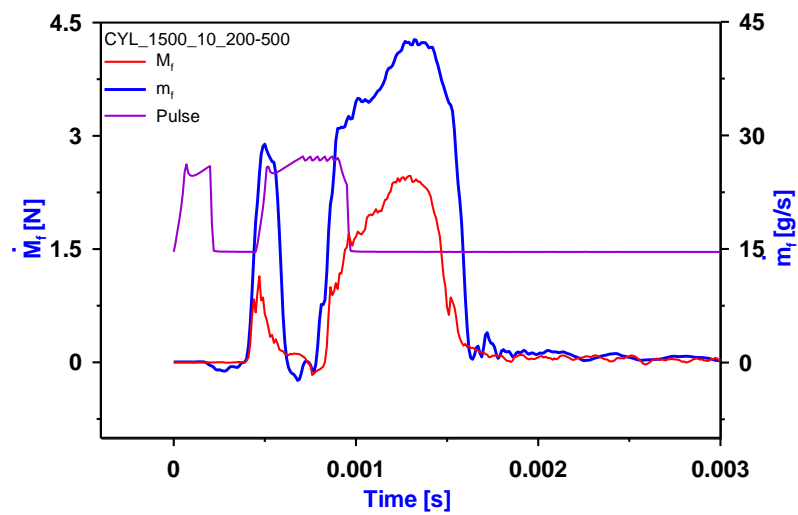
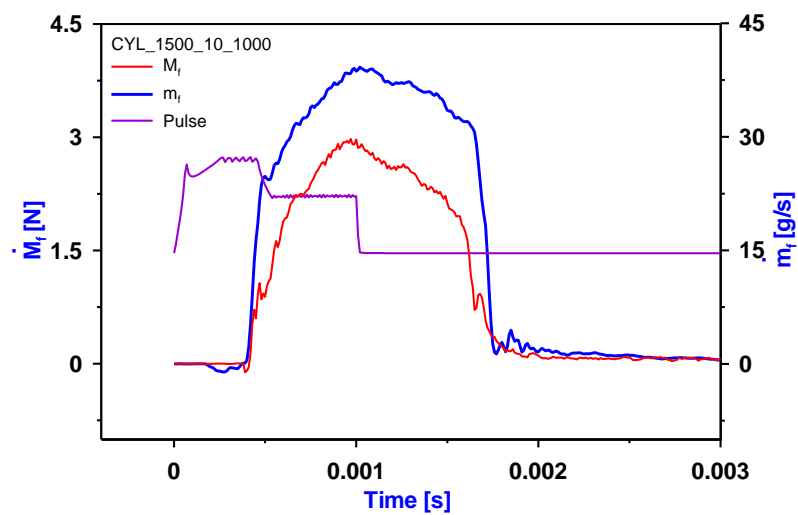
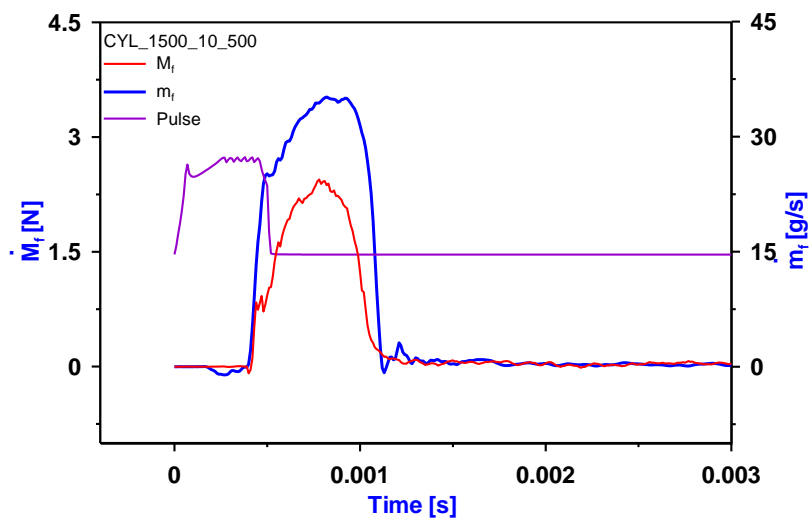
Emphase cylindrique - Pression rail: 800bar, Contrepression: 10bar



Emphase cylindrique - Pression rail: 800bar, Contrepression: 50bar



Emphase cylindrique - Pression rail: 1500bar, Contrepression: 10bar



Emphase cylindrique - Pression rail: 1500bar, Contrepression: 50bar

