

0. Présentation du sujet : système « common - rail »

- On assiste depuis quelques années à l'apparition de nouvelles générations de moteurs Diesel à injection directe, alimentés en carburant par des systèmes d'injection de plus en plus performants : injecteurs pompes, systèmes « common-rail »...
- On vous propose dans ce sujet d'analyser le fonctionnement et le comportement d'un système « common-rail » .
- Le sujet se compose :
 - ☞ **du texte** : 5 pages numérotées de 1/5 à 5/5,
 - ☞ **d'un dossier technique** : 9 pages numérotées de 1/9 à 9/9.
 - ☞ **D'un document réponse 1/1 à rendre obligatoirement.**
- On exige de rédiger convenablement les différents raisonnements et explications.
- Temps conseillés : ⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒⇒

	Temps conseillé
Lecture globale du sujet	10'
Partie 1	40'
Partie 2	1 h 20'
Partie 3	50'

Données et notations

P_{rail}	Pression dans le rail (bar)	1350	ΔV	Variation de volume (cm ³)	
P_H	Puissance hydraulique (Watt)		P_M	Puissance mécanique (Watt)	
n	Nombre de cylindres de la pompe	3	k	Rapport de transmission pompe / vilebrequin	0,5
V_p	Cylindrée pompe HP (cm ³ .tr ⁻¹)	0,65	n_p, n_v	Vitesses de rotation respectivement de la pompe et du vilebrequin (tr.s ⁻¹)	
χ_T	Module de compressibilité isotherme (bar⁻¹)	$\frac{1}{1,53.10^4}$ à 160 bar $\frac{1}{2,7.10^4}$ à 1350 bar	V_t	Volume total (rail + tubes HP) (cm ³)	?
η_{vp}	Rendement volumétrique de la pompe	0,95	V_T	Cylindrée moteur (dm ³)	2
η_{mp}	Rendement mécanique de la pompe	Voir graphique 3 page 4 / 9	ΔP	Différence de pression « aux bornes » de la pompe HP	
n_p, n_v	Nombre de tours pompe, et vilebrequin (tr)		T_O	« temps mort » de l'injecteur	
T_{inj}	Durée de l'impulsion de commande des injecteurs (μ s)		λ	Constante de débit des injecteurs	
G	Gain de l'injecteur pour une iso - pression rail (partie linéaire) en mm ³ . μ s ⁻¹		V_{inj}	Volume injecté par coup (mm ³ .coup ⁻¹)	

CODE EPREUVE :		EXAMEN : BTS		SPECIALITE : Moteurs à Combustion Interne	
SESSION	SUJET	EPREUVE :U52 étude et analyse des moteurs			
Durée : 3 h	Coefficient : 3		Code sujet :		Page 1 sur 1

1. Première partie : analyse système

- ☞ **objet de cette partie** : analyser les performances et les caractéristiques d'un système « common - rail » au niveau de la combustion.
- ☞ **Documents de travail** : « graphique 1 » et « graphique 2 » page 1/9 ; « figure 5 » page 6/9.

11 ANALYSE DE COMBUSTION

- A partir des documents « graphique 1 » et « graphique 2 » page 1/9 :

1.1.1. donner la définition des 4 paramètres suivants :

- ✓ gradient de pression | ✓ CA 50
- ✓ délai d'inflammation | ✓ HLC ;

1.1.2. évaluer graphiquement les valeurs : compléter le tableau 1 du document réponse 1/1

- ✓ avance à l'injection (pilote et principale) ;
- ✓ gradient de pression en phase de combustion en prémélange (ou combustion incontrôlée : dans la zone indiquée sur le graphique) ;
- ✓ les délais d'inflammation pour l'injection unique (cas sans pilote) et pour les injections pilote et principale (cas avec pilote) ;
- ✓ le HLC et le CA 50 pour les deux cas (avec et sans pilote) ;
- ✓ la vitesse maximale de dégagement d'énergie en phase de prémélange (ou combustion incontrôlée).

1.1.3. A partir des résultats précédents, justifier en 5 lignes l'intérêt de l'injection pilote.

12 « DEGRES DE LIBERTE » DU SYSTEME COMMON RAIL

- En vous aidant de la « figure 5 » page 6/9 :

1.2.1. quels sont les paramètres fonctionnels (variables de sortie du système), ou « degrés de liberté » disponibles sur ce système d'injection pour optimiser le fonctionnement du moteur (performance, rendement et pollution) :

- ✓ du point de vue quantité injectée ?
- ✓ du point de vue « phasage » ?

1.2.2. Exprimer la relation simple existant entre le volume de l'injection principale, le volume de consigne et le volume de l'injection pilote ;

1.2.3. exprimer sous forme d'équation(s) simple(s) le volume de consigne V_{consigne} en fonction des diverses variables logicielles définies sur la « figure 5 » page 6/9 . (Exemple de formalisme pour des grandeurs quelconques : $V = \text{mini}(V1, V2) * K + V3$).

CODE EPREUVE :		EXAMEN : BTS	SPECIALITE : Moteurs à Combustion Interne	
SESSION	SUJET	EPREUVE :U52 étude et analyse des moteurs		
Durée : 3 h	Coefficient : 3		Code sujet :	Page 2 sur 2

2. Deuxième partie : analyse du circuit hydraulique

☞ **Objet de cette partie** : il s'agit de calculer les pertes mécaniques engendrées par la pompe HP, puis de déterminer par calcul le volume du rail à utiliser.

Se référer aux notations du tableau de la page 1/5 pour les calculs et formules littérales et les applications numériques

21 ETUDE MECANIQUE

☞ **Documents de travail** : « graphique 3 » page 4/9;

☞ **Données** : pression $P_{\text{rail}} = 1350$ bars , rendement volumétrique = 0,95

2.1.1. calculer la puissance hydraulique *maximale* P_H développée par la pompe HP ;

2.1.2. en déduire la puissance mécanique *maximale* P_M absorbée par la pompe HP ;

2.1.3. calculer alors la part de « PMF » due à la pompe.

22 DETERMINATION DU VOLUME DU RAIL

☞ **Documents de travail** : « graphique 5 » page 5/9;

☞ **Cahier des charges** :

- ✓ **Contrainte n° 1** : Rapidité de la montée en pression : lors d'un démarrage la pression minimale de **160 bar** doit être atteinte en un nombre de tours moteur **inférieur ou égal à 1,5** (le calculateur interdit l'injection tant que $P_{\text{rail}} < 160$ bar);
- ✓ **Contrainte n° 2** : Variation de pression sous injection : lors d'une injection de carburant de **50 mm³**, la pression ne doit pas diminuer de plus de **5%** de la valeur de consigne (**1350 bar**).

☞ **Hypothèses de calcul** :

- ✓ On considère que le fluide subit une transformation isotherme (lors de la mise en pression et lors de l'injection). On rappelle la loi générale d'une telle transformation : $\Delta P = -\frac{1}{\chi_T} \cdot \frac{\Delta V}{V}$.
- ✓ On considère que le rail et les tubes sont parfaitement rigides;
- ✓ on prendra un rendement volumétrique de pompe = 1;
- ✓ on ne calculera que le volume global « rail + tuyauteries HP », qu'on appelle simplement « volume rail ».
- ✓ Les transformations envisagées se ramènent à de simples variations de volume (transformation en vase clos sans transfert de matière) : diminution de volume à la mise en pression et augmentation de volume lors d'une injection (voir le graphique 5 page 5/9).

Questions page suivante...

CODE EPREUVE :		EXAMEN : BTS	SPECIALITE : Moteurs à Combustion Interne	
SESSION	SUJET	EPREUVE :U52 étude et analyse des moteurs		
Durée : 3 h	Coefficient : 3		Code sujet :	Page 3 sur 3

2.2.1. Calculer la variation de volume ΔV_1 correspondant à la contrainte n°1 (phase de mise en pression du rail).

2.2.2. En fonction des hypothèses et des données, déterminer le volume du rail V_1 pour la contrainte du cahier des charges n°1; donner la formule littérale et l'application numérique.

2.2.3. De la même façon que précédemment, déterminer le volume du rail V_2 pour la contrainte du cahier des charges n° 2 ; donner la formule littérale et l'application numérique.

2.2.4. En déduire la « plage » de volume possible pour le volume rail.

L'expérience montre que le constructeur privilégie la rapidité de montée en pression ; quelle sera alors la valeur à choisir pour le volume rail ?

3. Analyse fonctionnelle des électro-injecteurs

☞ **Objet de cette partie** : il s'agit d'analyser de façon « temporelle » puis « débitométrique » le comportement d'un injecteur.

31 ETUDE « TEMPORELLE »

☞ **Documents de travail** : « graphique 6 » page 7/9; « figure 3 » page 3/9 ; « graphique 7 » et « graphique 8 » page 8/9.

3.1.1. Déterminer sur les graphes les valeurs : compléter le tableau 2 du document réponse

1/1

- de la durée de l'impulsion de commande,
 - de la durée de l'injection effective (débit effectif),
 - du délai à l'ouverture,
 - du délai à la fermeture,
 - du volume injecté (valeur approchée) ; préciser la méthode adoptée.
- (Du débit réel par rapport au début et à la fin de l'impulsion de commande)

3.1.2. sur les « graphique 7 » et « graphique 8 », déterminer les délais à l'ouverture et à la fermeture (du débit effectif par rapport au début et à la fin de l'impulsion de commande); compléter le tableau 3 du document réponse 1/1

CODE EPREUVE :		EXAMEN : BTS	SPECIALITE : Moteurs à Combustion Interne	
SESSION	SUJET	EPREUVE :U52 étude et analyse des moteurs		
Durée : 3 h	Coefficient : 3		Code sujet :	Page 4 sur 4

☞ **Documents de travail** : « graphique 9 » page 9/9;

☞ **données** : cartographie de débit : sur chaque « iso-pression rail » on remarque 2 zones distinctes : une première partie non linéaire, puis une deuxième partie assimilable à un segment de droite. **Pour la suite des questions, on ne s'intéresse qu'à la partie linéaire.**

3.2.1. Par simple analyse graphique (« graphique 9 ») : compléter le tableau 4 du document réponse 1/1

- ✓ Déterminer l'offset (décalage à l'origine) de temps T_0 pour chaque pression rail (zones linéaires)
- ✓ Déterminer la pente ou débit statique pour chaque pression rail (zones linéaires);
- ✓ En déduire l'équation de débit $V_{inj} = f(T_{inj}, T_0)$ pour chaque pression rail (zones linéaires).

3.2.2. A partir des résultats précédents et de l'analyse « temporelle » (questions 3.1.1. , 3.1.2 et 3.2.2), justifier en 5 lignes maximum le comportement de l'injecteur : valeur et signe de l'offset T_0 en fonction de P_{rail} et pente des droites);

3.2.3. en comparant les trois volumes injectés (3 pressions rail : 200, 700 et 1350 bar) pour une même durée théorique de commande de 1500 μs , montrer que le modèle simplifié de débit en zone linéaire $V_{inj} = \lambda \cdot \sqrt{P_{rail}} \cdot (T_{inj} - T_0)$ est acceptable.

CODE EPREUVE :		EXAMEN : BTS	SPECIALITE : Moteurs à Combustion Interne	
SESSION	SUJET	EPREUVE :U52 étude et analyse des moteurs		
Durée : 3 h	Coefficient : 3		Code sujet :	Page 5 sur 5

Document Réponse

• **Tableau 1**

	Avance à l'injection	Gradient de pression en phase de combustion incontrôlée	Délai d'inflammation	HLC (maxi)	CA50	Vitesse maxi de dégagement d'énergie en phase de combustion incontrôlée
Cas injection unique						
Pilote						
Principale						

• **Tableau 2**

Durée de l'impulsion de commande	Durée de l'injection effective	Délai à l'ouverture	Délai à la fermeture	Volume injecté

• **Tableau 3**

	Délai à l'ouverture	Délai à la fermeture
700 bars – 900µs		
200 bars – 1500µs		

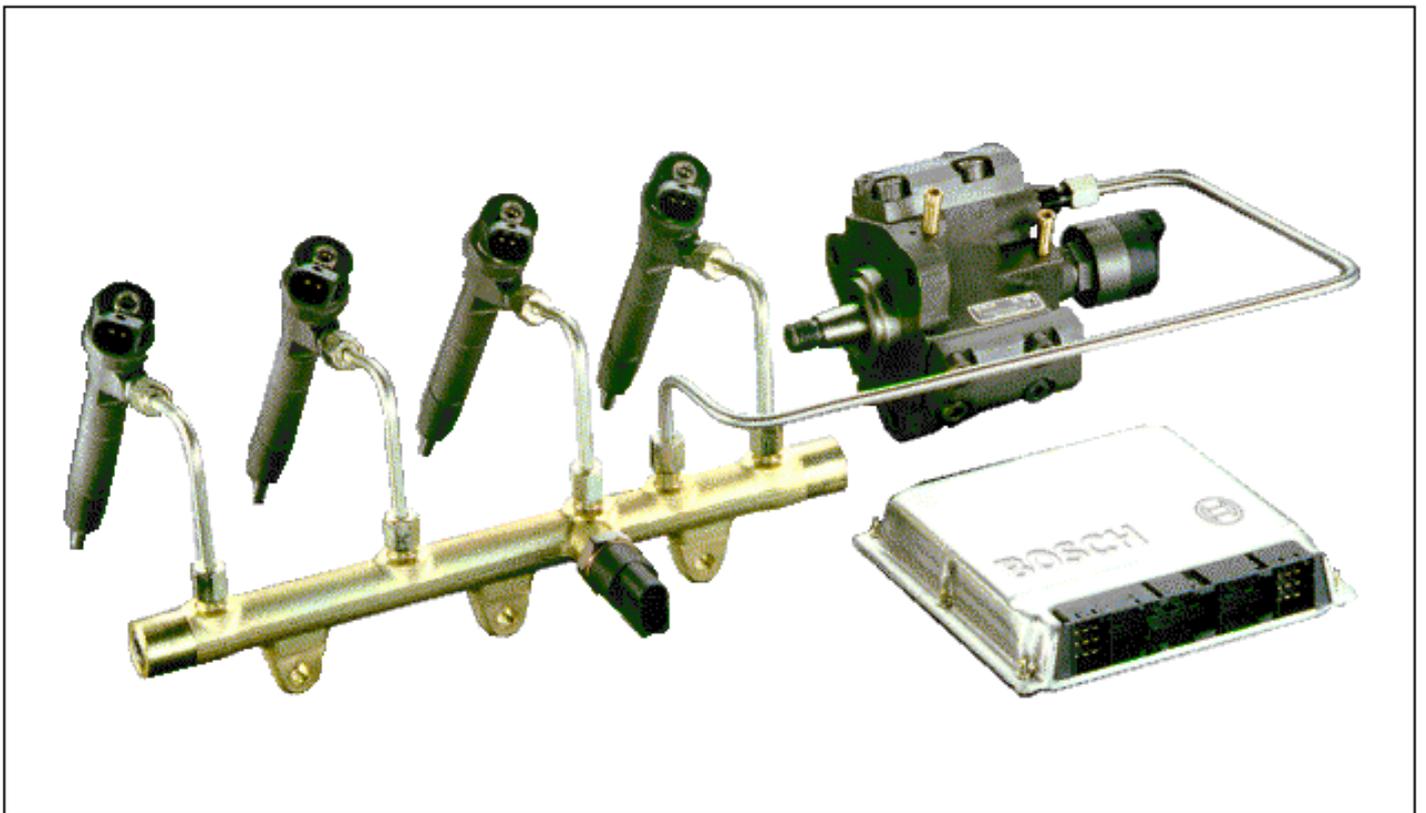
• **Tableau 4**

	200 bars	700 bars	1300 bars
Pente (débit statique) G			
Offset To			
Equation littérale de débit : $V_{inj} = f(T_{inj}, T_o)$			
Equation de débit pour chaque cas			

CODE EPREUVE :		EXAMEN : BTS		SPECIALITE : Moteurs à Combustion Interne	
SESSION	Document Réponse	EPREUVE :U52 étude et analyse des moteurs			
Durée : 3 h		Coefficient : 3		Code sujet :	
Page 1 sur 1					

dossier technique

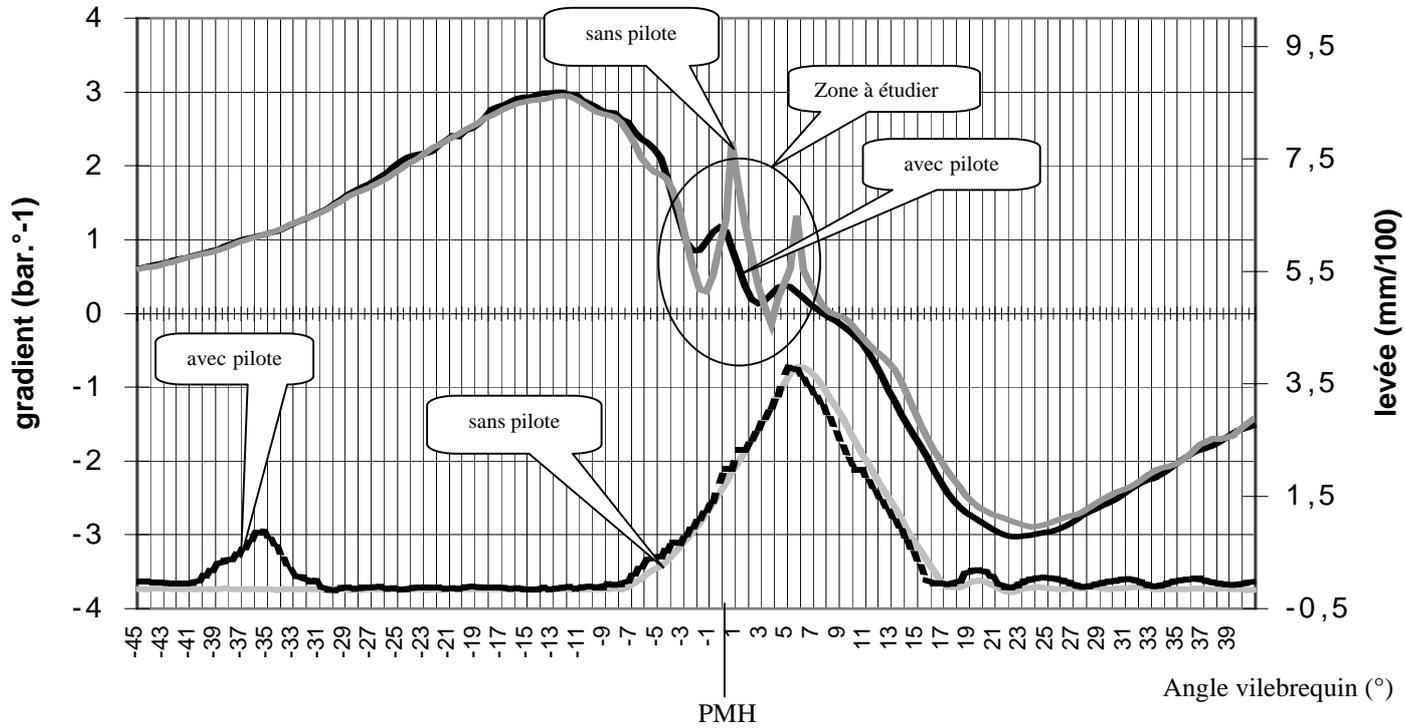
"common-rail"



1. analyse combustion

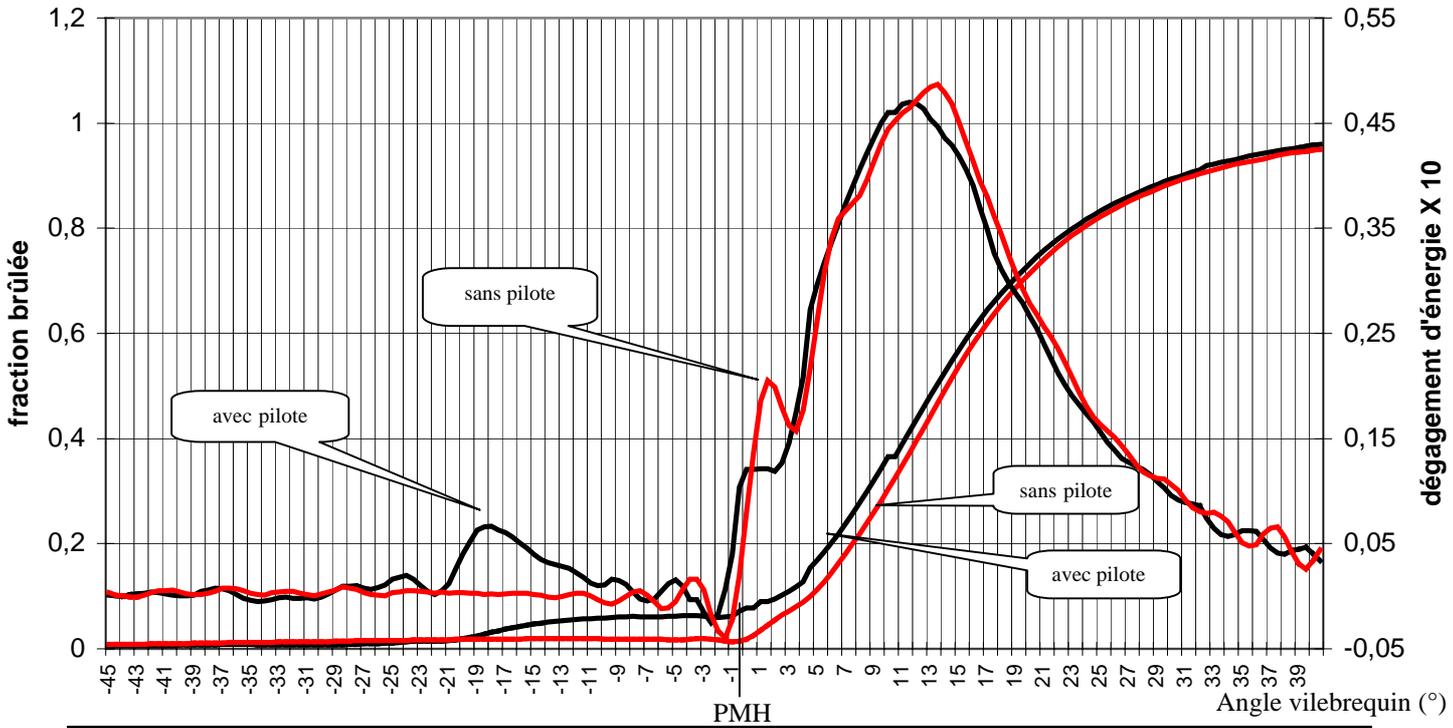
Graphique 1

gradient de pression et levée d'aiguille



Graphique 2

fraction brûlée et dégagement d'énergie



CODE EPREUVE :		EXAMEN :	SPECIALITE :	
		BTS	Moteurs à Combustion Interne	
SESSION	SUJET	EPREUVE :U52 : étude et analyse des moteurs		
Durée : 3 h	Coefficient : 3	Code sujet :	Dossier technique : Page 1 sur 1	

2. système de contrôle moteur BOSCH EDC 15 : présentation générale-schéma hydraulique

- 1 pompe haute pression,
- 2 vanne de désactivation d'élément,
- 3 régulateur de pression,
- 4 filtre à carburant,
- 5 réservoir de carburant avec préfiltre et pompe de réalimentation,
- 6 calculateur électronique,
- 7 module de commande du temps de préchauffage,
- 8 batterie,
- 9 accumulateur haute pression (rail),
- 10 capteur manométrique de rail,
- 11 limiteur de débit,
- 12 limiteur de pression,
- 13 capteur de température du carburant,
- 14 injecteur,
- 15 bougie-crayon de préchauffage,
- 16 capteur de température du liquide de refroidissement,
- 17 capteur de vitesse de vilebrequin,
- 18 capteur de vitesse d'arbre à cames,
- 19 capteur de température de l'air d'admission,
- 20 capteur de pression de suralimentation,
- 21 débitmètre massique d'air,
- 22 turbocompresseur,
- 23 actionneur de recyclage des gaz d'échappement,
- 24 actionneur de pression de suralimentation,
- 25 pompe à dépression,
- 26 combiné d'instruments avec indicateurs de consommation, de vitesse de rotation, etc.,
- 27 capteur d'accélérateur,
- 28 contacteurs de freins,
- 29 contacteur d'embrayage,
- 30 capteur de vitesse de roulage,
- 31 commande du régulateur de vitesse de roulage,
- 32 compresseur de climatiseur,
- 33 commande de climatiseur,
- 34 afficheur de diagnostic avec connexion pour testeur.

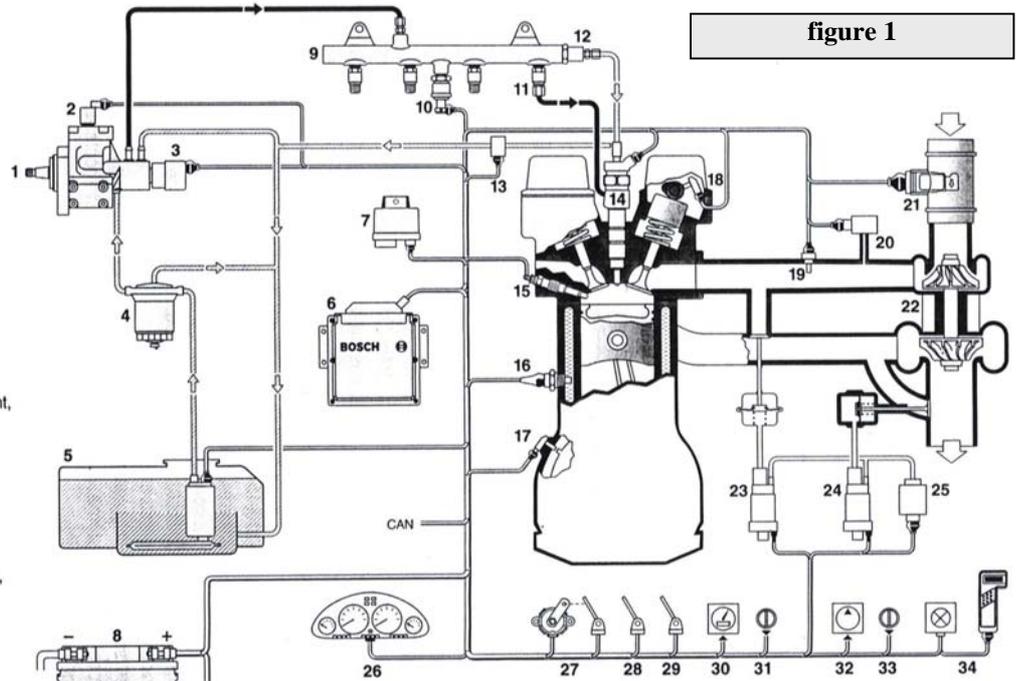


figure 1

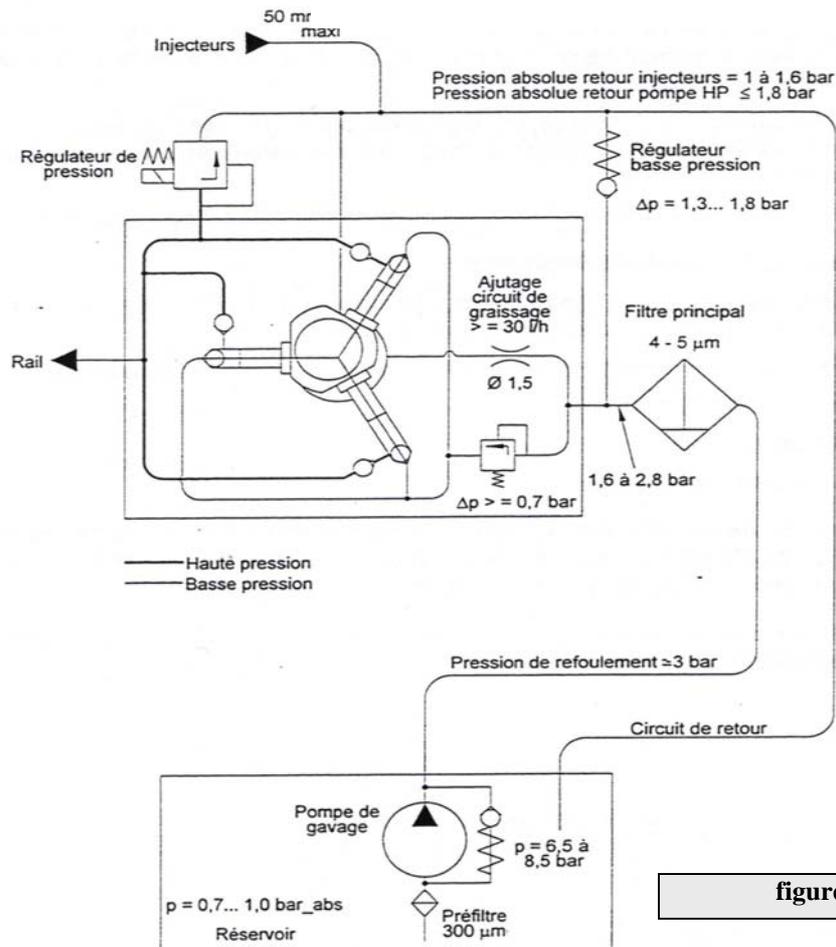
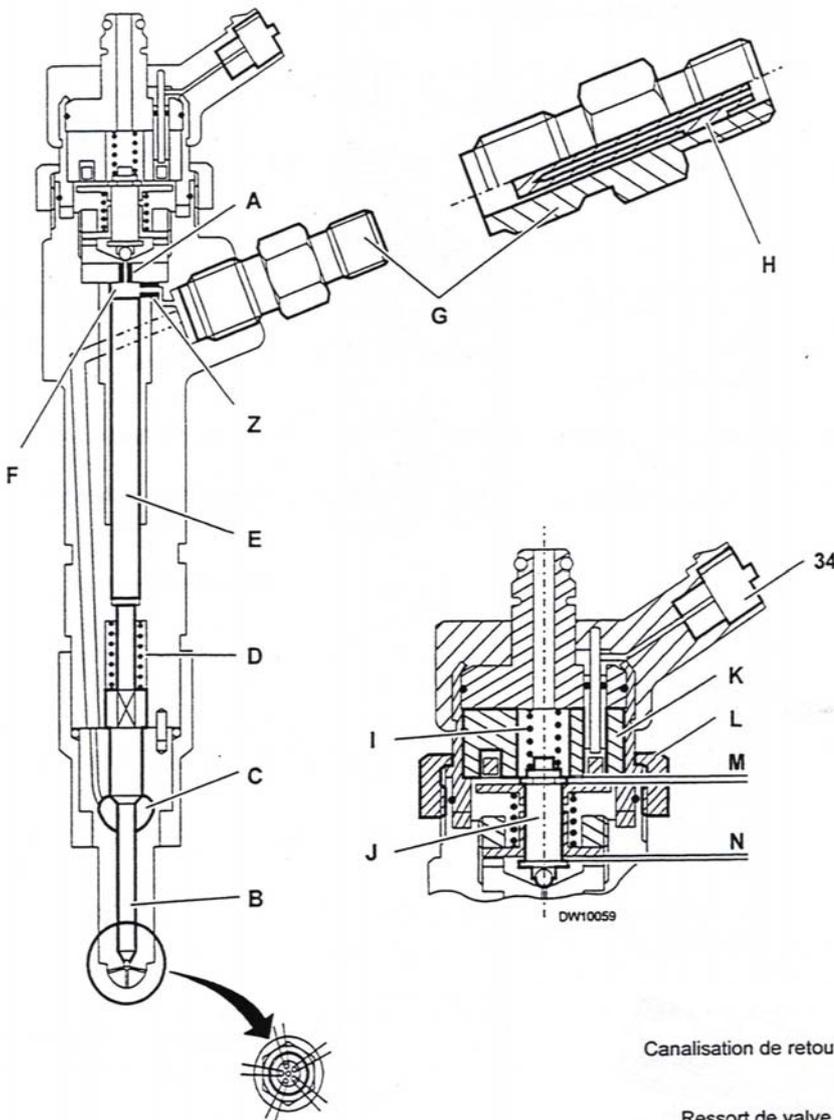


figure 2

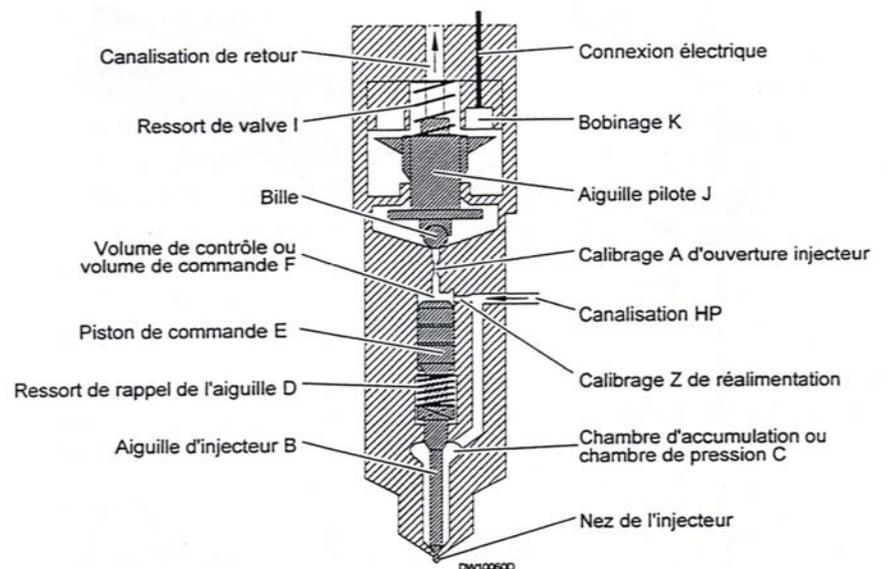
CODE EPREUVE :		EXAMEN :	SPECIALITE :	
		BTS	Moteurs à Combustion Interne	
SESSION	SUJET	EPREUVE : U52 : étude et analyse des moteurs		
Durée : 3 h	Coefficient : 3	Code sujet :	Dossier technique : Page 2 sur 2	

3. électro-injecteurs



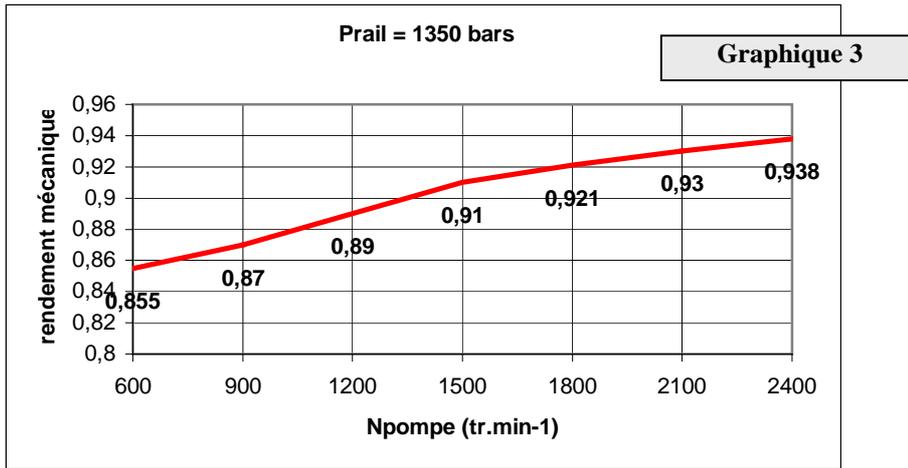
A	Ajutage d'ouverture
Z	Ajutage de réalimentation
B	Aiguille d'injecteur
C	Chambre de pression
D	Ressort d'injecteur
E	Piston de commande
F	Chambre de commande
G	Raccord
H	Filtre laminaire
I	Ressort principal
J	Aiguille pilote et bille
K	Solénoïde
L	Ecrou
M, N	Jeu de fonctionnement

figure 3



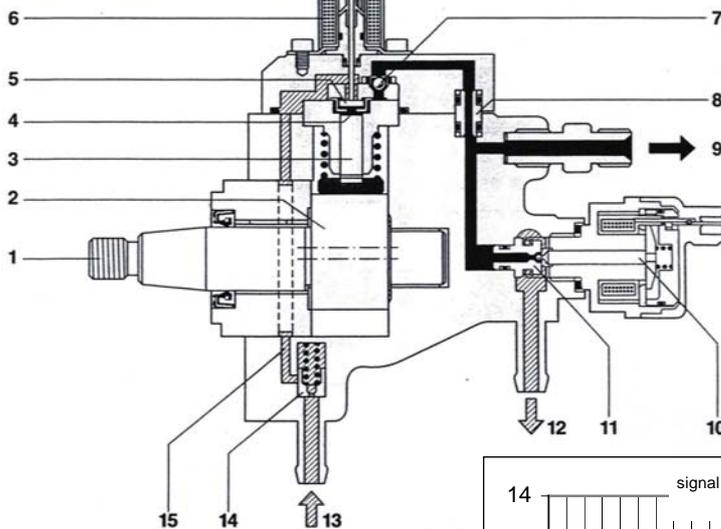
CODE EPREUVE :		EXAMEN :	SPECIALITE :	
		BTS	Moteurs à Combustion Interne	
SESSION	SUJET	EPREUVE : U52 : étude et analyse des moteurs		
Durée : 3 h	Coefficient : 3	Code sujet :	Dossier technique : Page 3 sur 3	

4. pompe haute pression



5. circuit hydraulique : pompe - régulateur de pression rail

1 arbre d'entraînement, 2 came excentrique, 3 élément et piston de pompage, 4 chambre d'élément, 5 soupape d'admission, 6 vanne de désactivation d'élément, 7 soupape d'échappement, 8 joint, 9 raccord haute pression vers le rail, 10 régulateur de pression, 11 clapet à bille, 12 retour du carburant, 13 entrée du carburant, 14 soupape de sécurité avec orifice calibré, 15 canal basse pression vers l'élément de pompage.



Régulateur de pression.
- clapet à bille,
- induit,
- électro-aimant,
- ressort,
- connexion électrique.

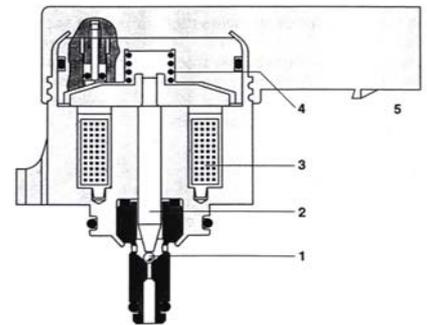
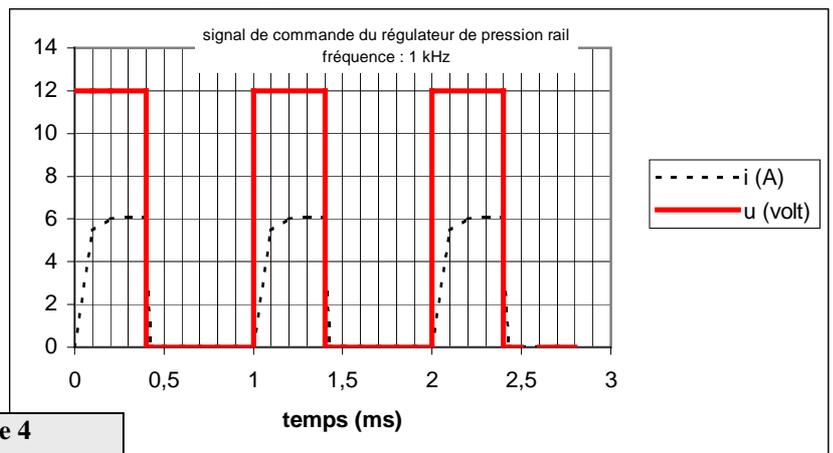


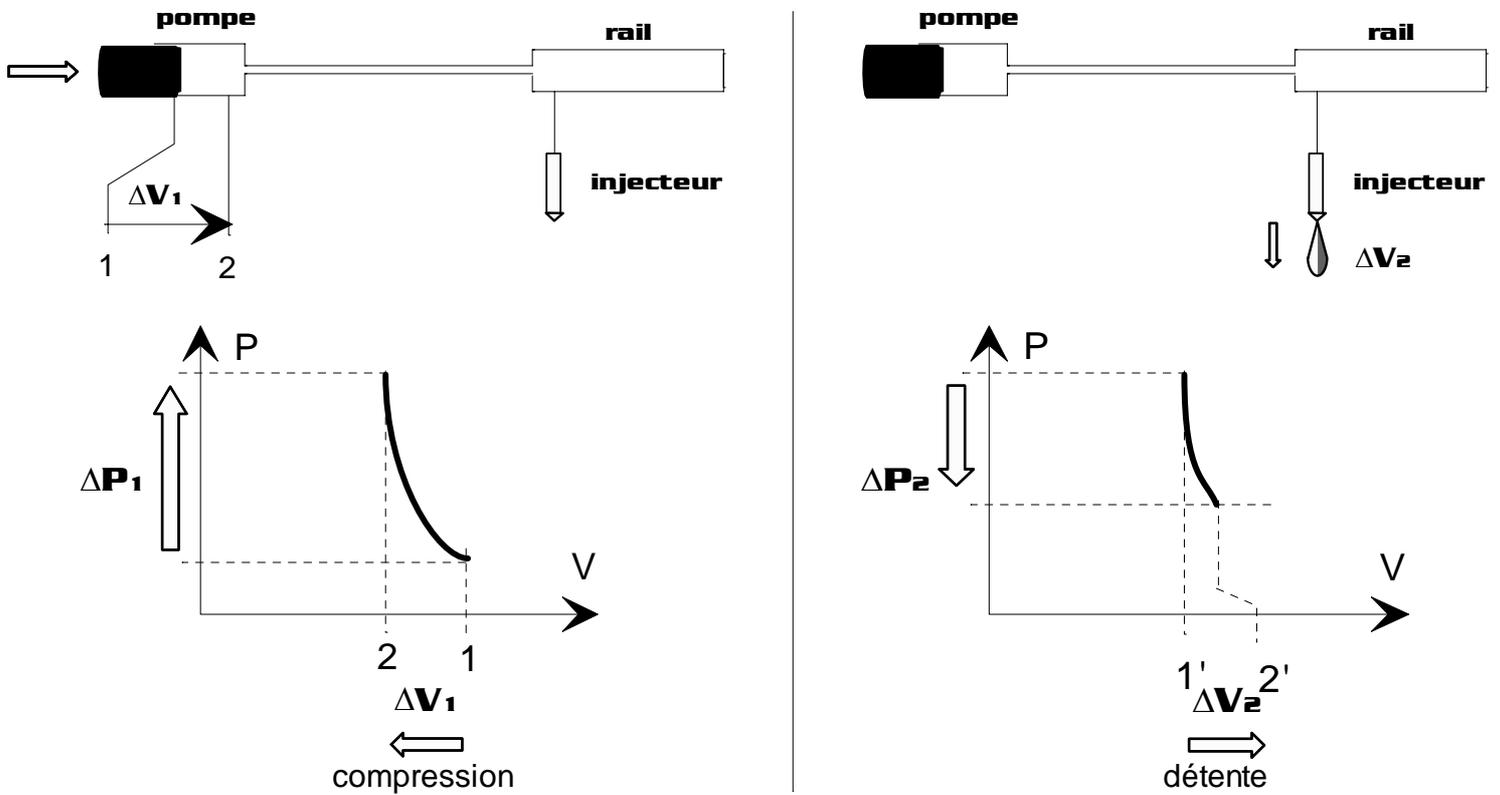
figure 4



CODE EPREUVE :		EXAMEN :	SPECIALITE :	
		BTS	Moteurs à Combustion Interne	
SESSION	SUJET	EPREUVE :U52 : étude et analyse des moteurs		
Durée : 3 h	Coefficient : 3	Code sujet :	Dossier technique : Page 4 sur 4	

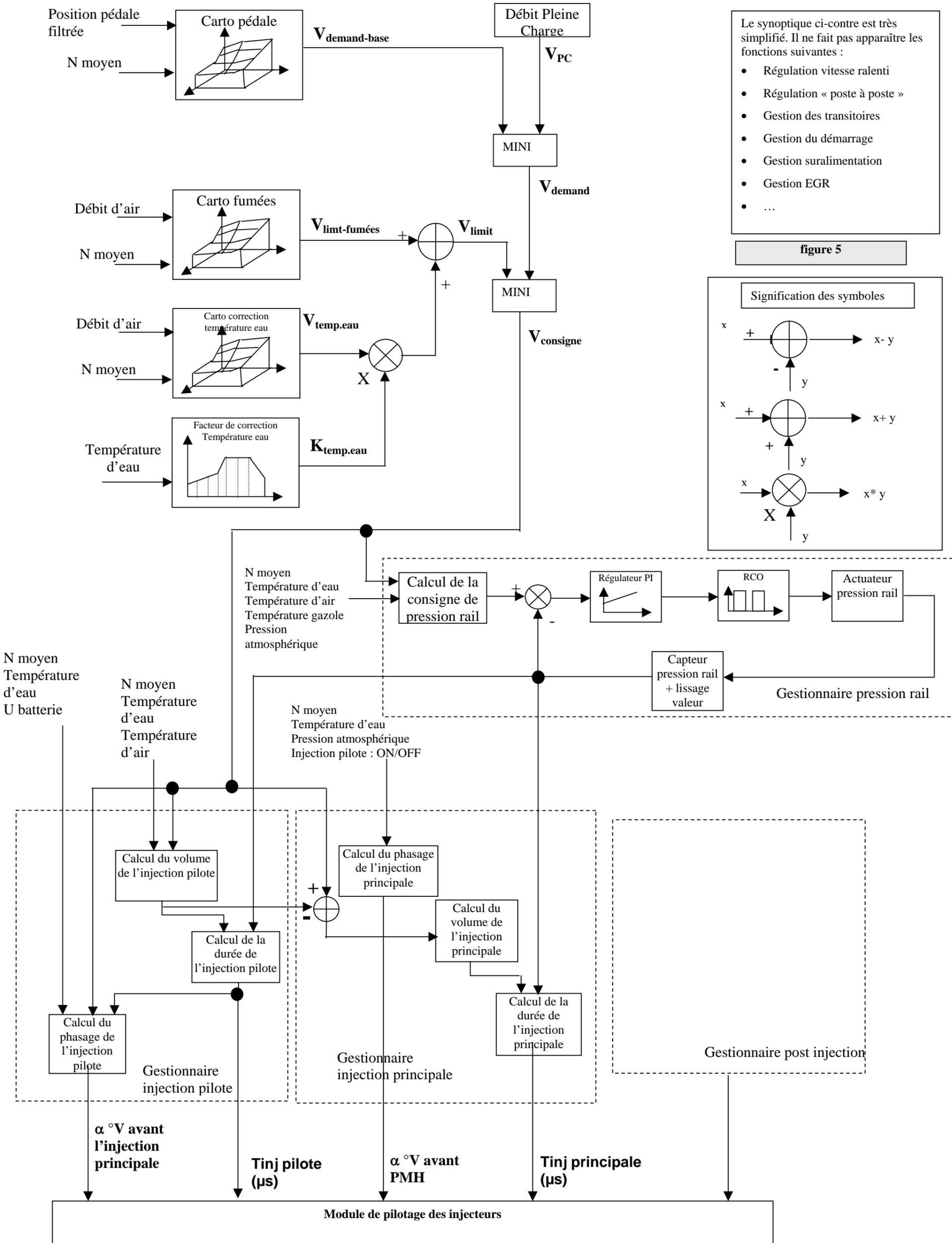
6. modélisation pour le calcul de volume du rail

Graphique 5



CODE EPREUVE :		EXAMEN :	SPECIALITE :	
		BTS	Moteurs à Combustion Interne	
SESSION	SUJET	EPREUVE :U52 : étude et analyse des moteurs		
Durée : 3 h	Coefficient : 3	Code sujet :	Dossier technique : Page 5 sur 5	

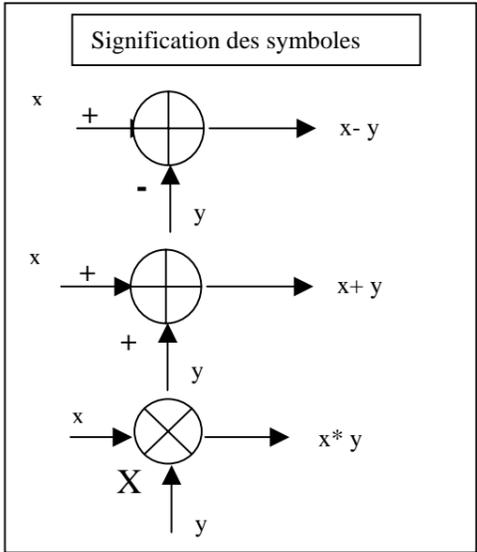
7. synoptique général simplifié de la partie logicielle



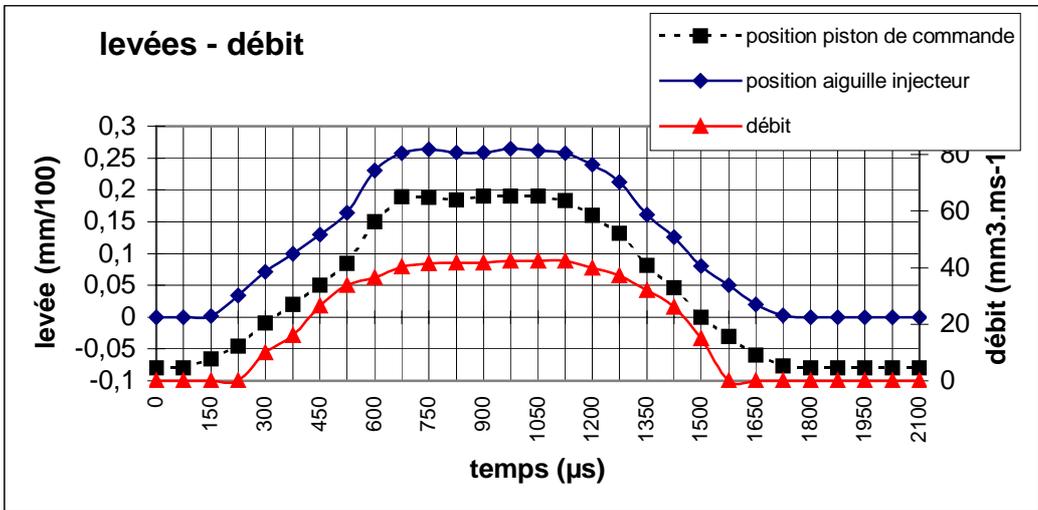
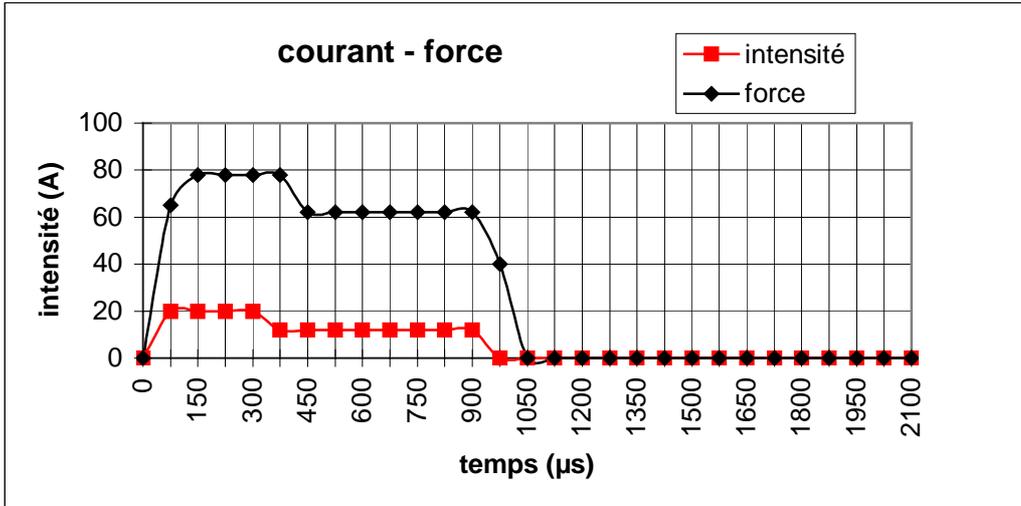
Le synoptique ci-contre est très simplifié. Il ne fait pas apparaître les fonctions suivantes :

- Régulation vitesse ralenti
- Régulation « poste à poste »
- Gestion des transitoires
- Gestion du démarrage
- Gestion suralimentation
- Gestion EGR
- ...

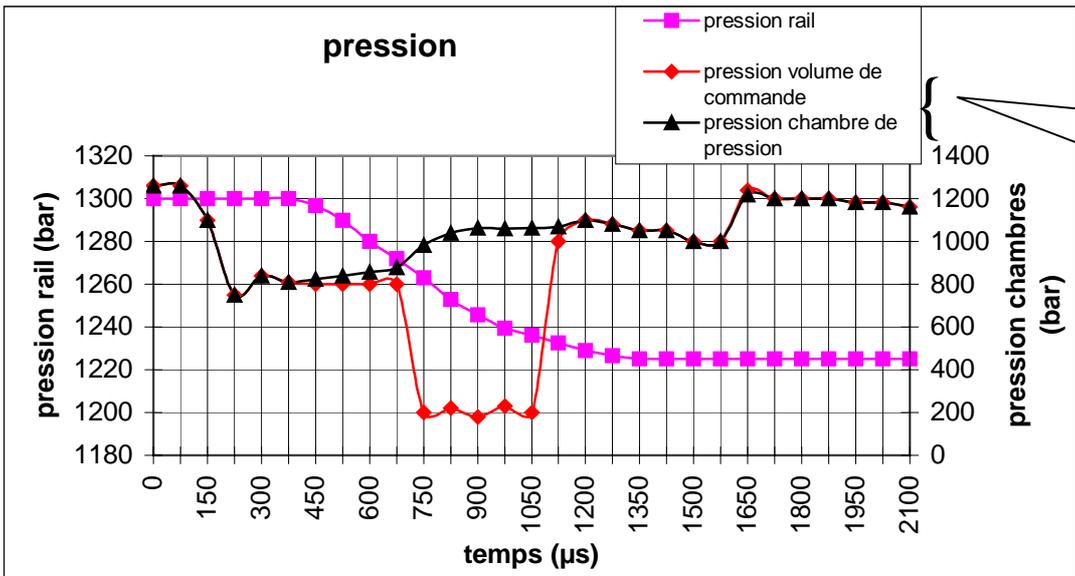
figure 5



8. simulation injection : à charge élevée



Essai avec un volume de rail de 15 cm³

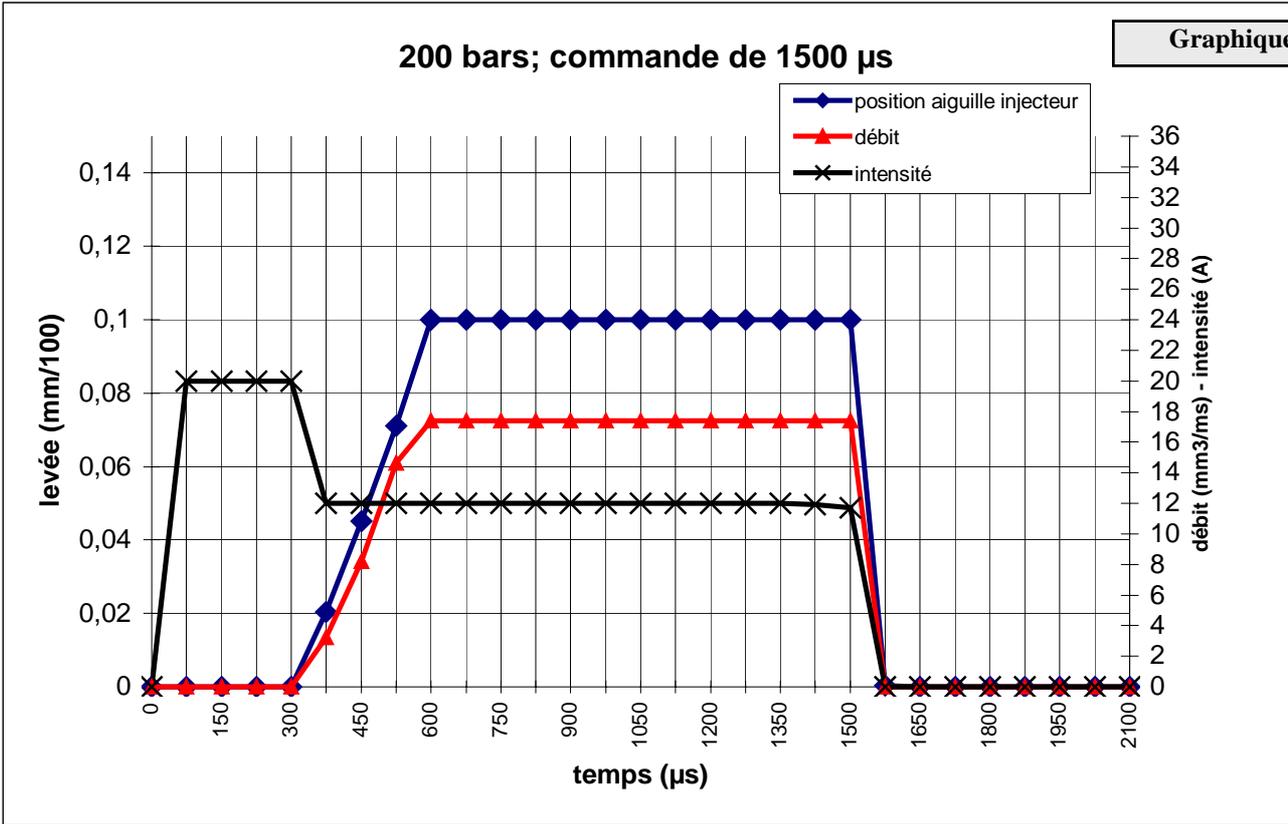
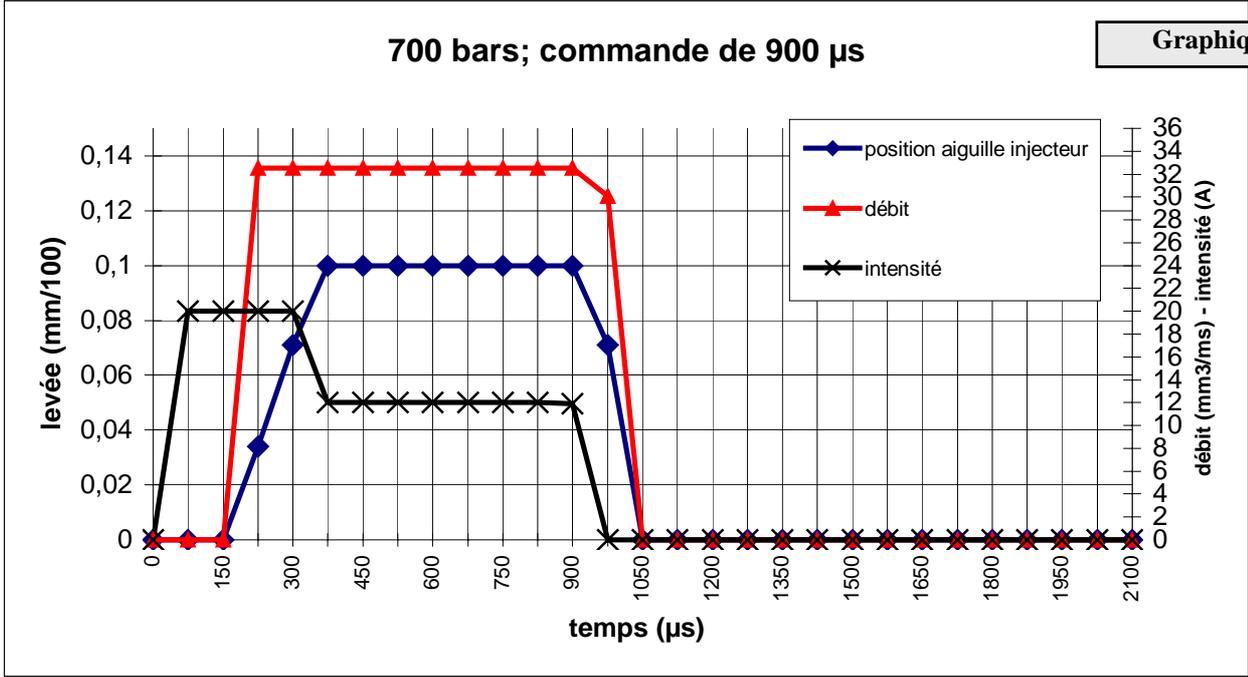


Attention : à lire sur l'échelle de droite

Graphique 6

CODE EPREUVE :		EXAMEN :	SPECIALITE :
		BTS	Moteurs à Combustion Interne
SESSION	SUJET	EPREUVE : U52 : étude et analyse des moteurs	

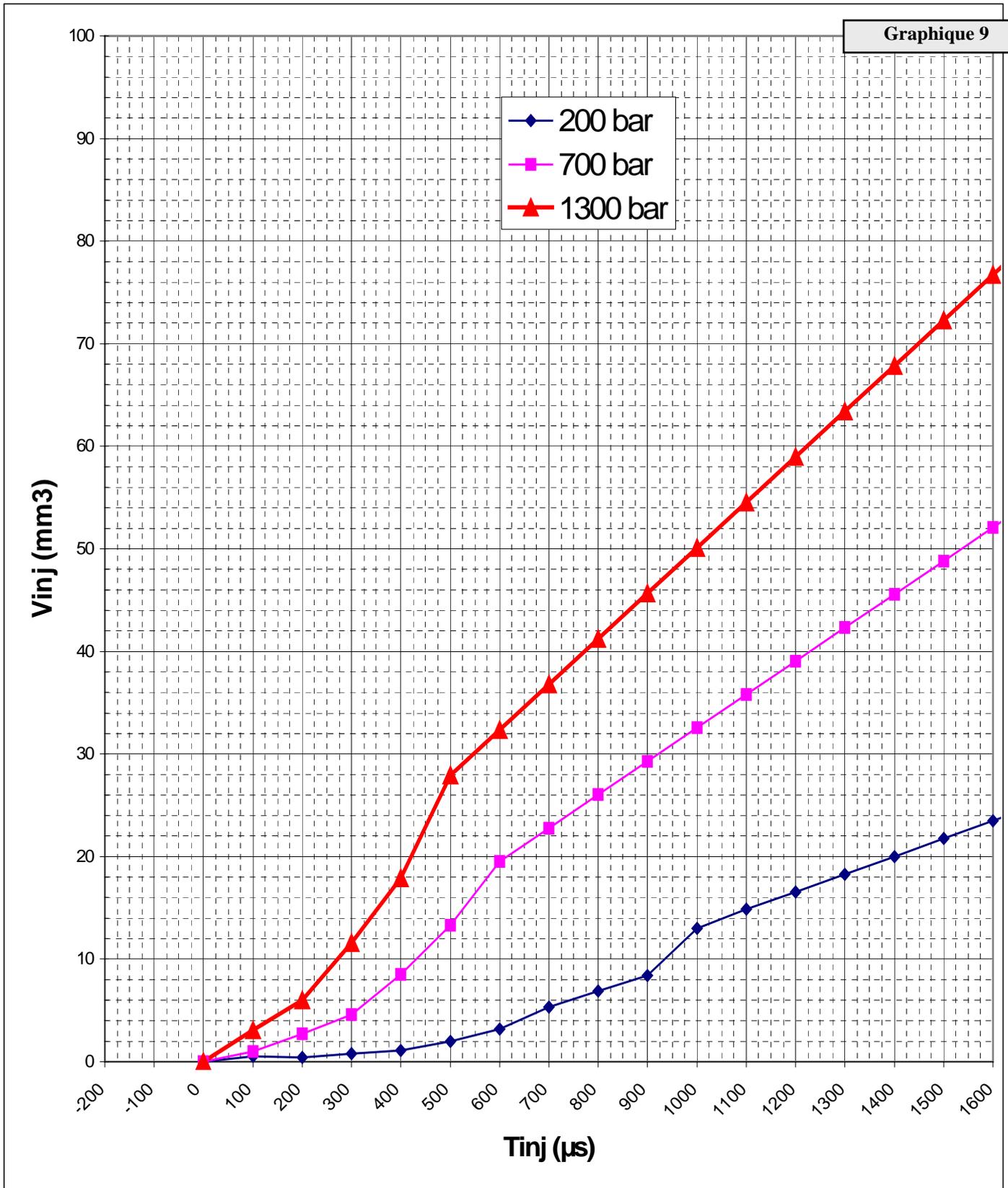
9. simulation injection : à charge partielle



CODE EPREUVE :		EXAMEN :		SPECIALITE :	
		BTS		Moteurs à Combustion Interne	
SESSION	SUJET	EPREUVE : U52 : étude et analyse des moteurs			
Durée : 3 h	Coefficient : 3	Code sujet :	Dossier technique : Page 8 sur 8		

10. caractéristique injecteur

Graphique 9



CODE EPREUVE :		EXAMEN :	SPECIALITE :
		BTS	Moteurs à Combustion Interne
SESSION	SUJET	EPREUVE : U52 : étude et analyse des moteurs	
Durée : 3 h	Coefficient : 3	Code sujet :	Dossier technique : Page 9 sur 9