
CHAPITRE III

Modélisation du Moteur Diesel

3.1 Introduction

Longtemps considérés comme polluants, les moteurs diesel sont aujourd'hui autant vus plus propres que les moteurs essences. Ces moteurs étaient appréciés pour leur robustesse, leur couple important et leur faible coût vis-à-vis de la consommation de carburant (le prix de l'essence était environ 50% plus élevé que celui du gasoil). Dans ces moteurs, le carburant s'auto-enflamme sous l'effet d'une compression très importante [LAURENT 09].

Malgré les avantages présentés par les moteurs diesel, leur forte pollution surtout en présence des défauts, nous oblige à trouver des solutions efficaces pour résoudre à ce grand problème.

Nous choisissons le moteur diesel comme système mécanique pour notre étude, dans le seul but de développer une stratégie de diagnostic qui va aider à prédire tout déséquilibre, afin de respecter les normes d'antipollution.

Dans ce chapitre nous avons essayé de rassembler les connaissances relatives au moteur diesel. Nous commençons par une description de la structure du moteur (§ 3.2). Ensuite une classification des différents types de moteur diesel (§3.3). Nous évoquons aussi le cycle de fonctionnement d'un moteur diesel à quatre temps (§3.4). Finalement dans ce chapitre, nous présentons les différents modèles d'un moteur diesel (§3.5) et les résultats de simulation de modèle (§3.6). On termine ce chapitre par une conclusion (§3.7).

3.2 Architecture d'un moteur diesel

3.2.1 Bloc moteur (Carter-cylindre)

Le bloc moteur est la partie la plus massive, il contient les cylindres et reçoit l'ensemble des organes du moteur (équipement d'injection, vilebrequin, ...). Afin de résister aux pressions élevées pendant la combustion le bloc moteur doit être robuste et étanche.

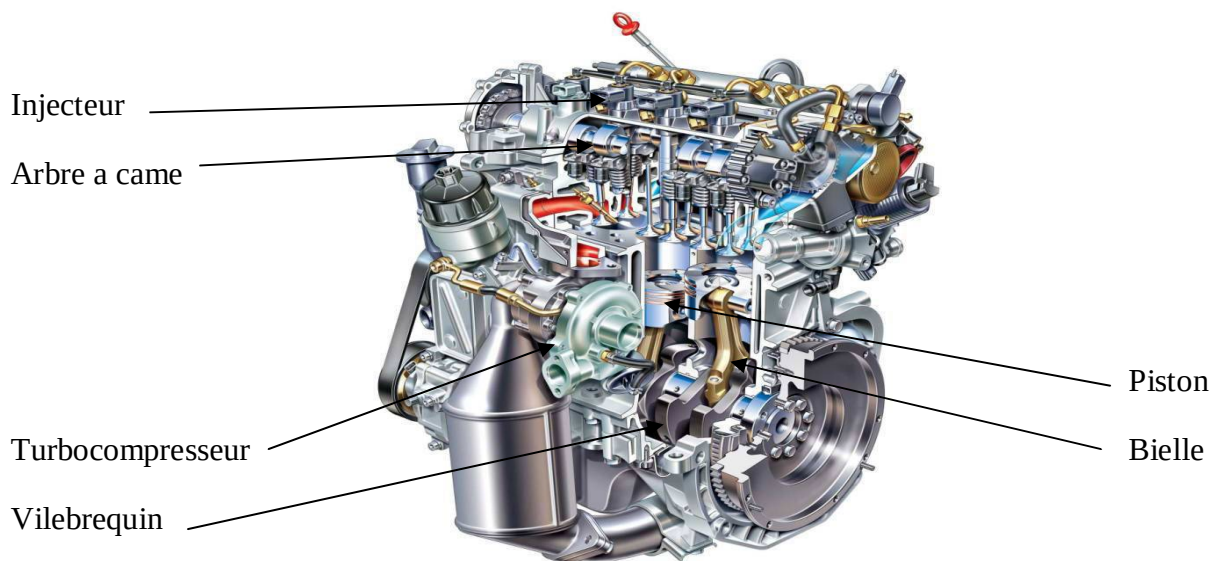


Figure 3.1 : Moteur diesel a injection directe [OLIVIER 04].

3.2.2 Cylindres

Comme son nom l'indique, un cylindre est un tube creux, sa surface a subi un traitement qui le rend résistant aux frottements, ainsi qu'aux températures élevées.

Les cylindres sont, soit alésés directement dans le bloc moteur, soit constitués par une chemise en aluminium insérée dans l'alésage. Les moteurs d'automobiles sont toujours poly-cylindriques (deux à douze cylindres). Les cylindres peuvent être disposés en ligne (voiture de tourisme), à plat ou en V (les gros moteurs).

3.2.3 Le piston

Le piston coulisse dans le cylindre selon un mouvement rectiligne de va-et-vient. C'est un élément essentiel puisque sa fonction consiste à transformer la pression qui s'exerce sur son sommet lors de la combustion en effort sur la bielle. La tête du piston peut être plate ou présenter un relief (généralement concave appelé le bol) [BENCHERIF 18].

3.2.4 La Bielle

La bielle est un élément intermédiaire qui permet la transmission des forces entre deux éléments animés de mouvements différents :

- Le mouvement rectiligne alternatif du piston.
- Le mouvement circulaire continu du vilebrequin.

Par la combinaison des mouvements rapides du piston et du vilebrequin, cet élément est soumis à de multiples contraintes : la **compression**, la **traction**, la **flexion**.

3.2.5 Le vilebrequin

Il est réalisé en acier allié, forgé ou matricé. L'arbre vilebrequin commande la distribution, la pompe d'injection, la pompe d'alimentation, la pompe à eau, le générateur et la pompe à huile.

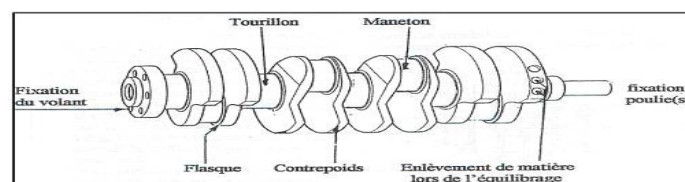


Figure 3.2 : Éléments d'un vilebrequin.

Avec la bielle il termine la transformation du mouvement rectiligne alternatif du piston en mouvement circulaire continu. Les contraintes subies par le vilebrequin sont des **torsions** provenant des efforts opposés du couple moteur et du couple résistant, **flexions**, **compressions**, **tractions**, **cisaillements**, Frottements au niveau des portées et les Vibrations

provenant de la masse du vilebrequin lancé à grande vitesse. Un vilebrequin doit posséder des qualités afin de résister aux efforts qui lui sont soumis :

- Bras de manivelle robuste.
- Géométrie indéformable.
- Équilibrage parfait.

3.2.6 L'arbre à cames

Il est chargé de commander la levée des soupapes et pendant une durée bien déterminée. Le mouvement de l'arbre à cames doit être lié de façon invariable à celui du vilebrequin. La synchronisation de l'arbre à cames et de vilebrequin s'appelle « **le calage de la distribution** ». Ce calage, très important car il assure le respect de l'épure de distribution définie par le constructeur, s'effectue grâce à des repères marqués à l'usinage [CEDRA 90].

3.2.7 Le système d'injection

C'est un organe essentiel car le moteur Diesel nécessite un dosage rigoureux du combustible. La pompe d'injection assure l'alimentation des injecteurs, ces derniers sont chargés de laisser entrer la quantité adéquate de carburant aux instants désirés.

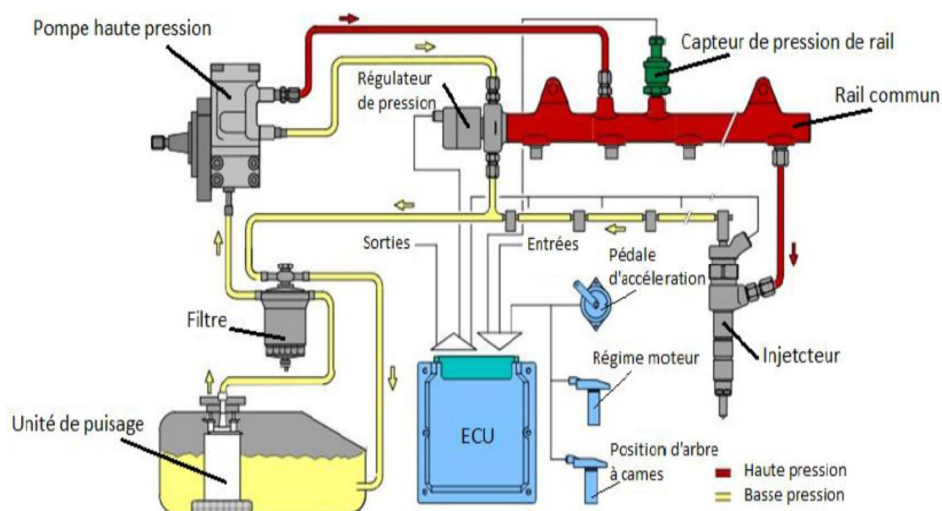


Figure 3.3 : Système d'injection directe diesel à rampe commune [BOSCH 08].

Le système d'injection se divise en trois parties : la basse pression, la haute pression et la gestion électronique.

Un injecteur se compose d'une soupape d'injection ou aiguille et d'un logement appelé corps ou buse.

3.2.8 Différents capteurs d'un moteur diesel

Voilà les différents capteurs que l'on peut trouver sur un véhicule moderne

3.2.8.1 Capteur d'arbre à cames

Il est situé sur la culasse, son rôle c'est la détermination de la position du pignon pour indexer celle de l'arbre à cames.

Les données provenant de ce capteur sont nécessaires pour des fonctions telles que le lancement de l'injection sur des moteurs à injection séquentielle, le signal du régulateur de pression de la valve électromagnétique de la pompe à injection et le contrôle de fin de cours d'un cylindre particulier.



Figure 3.4 : capteur d'arbre à cames.

3.2.8.2 Capteur de vilebrequin

Il est du type inductif, il est situé sur le carter d'embrayage. Ce capteur fournit des informations sur la position du vilebrequin que le calculateur d'injection utilise pour calculer le régime moteur. Ces données permettent de déterminer l'injection de carburant la plus économique et le moment de l'amorçage.



Figure 3.5: capteur de vilebrequin.

3.2.8.3 Capteur de température de carburant

Il est situé sur la pompe haute pression. Il permet au calculateur d'apporter des corrections sur le débit de carburant injecté.



Figure 3.6 : Capteur de température de carburant.

3.2.8.3 Capteurs de température d'air d'admission

Il y a deux capteurs (sonde de température d'air amont et d'air aval) qui mesurent la température de l'air admis dans le moteur. Avec les deux informations de température combinée à la valeur de pression de suralimentation le calculateur détermine la masse d'air admise



Figure 3.7 : Capteur de température d'air d'admission.

3.2.8.5 Capteur de vitesse du véhicule

Le capteur est situé en sortie boîte de vitesses. Il permet au calculateur de connaître différentes configurations d'utilisation du véhicule :

- Arrêt ou roulant ;
- En décélération ou en accélération ;
- Le rapport de boîte de vitesses engagé ;

3.2.8.6 Capteur de phase

Ce capteur est du type à effet Hall (signal carré).

Il est situé dans la culasse, au niveau de l'arbre à cames. Il permet au calculateur de connaître la position du premier cylindre. Certains constructeurs ont prévu un réglage de l'entrefer.

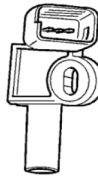


Figure 3.8 : Capteur de phase.

3.3 Différents types de moteur Diesel

Dans le monde actuel il existe trois types de moteurs Diesel

3.3.1 Moteurs à injection directs

- L'injecteur débouche directement dans la chambre principale.
- La pression d'injection est élevée : 200 à 400 bars.
- Le sommet du piston est plat, ou creux lorsque l'on désire donner un mouvement de turbulence.

L'injection directe est apparue en grandes séries tout d'abord sur les moteurs diesel. Elle est aujourd'hui très répandue sur ce type de motorisation.

Les systèmes d'injection directe injectent le carburant aux endroits où la combustion aura une efficacité maximale. Ils utilisent l'électronique pour piloter la quantité de carburant introduite dans la chambre de combustion.

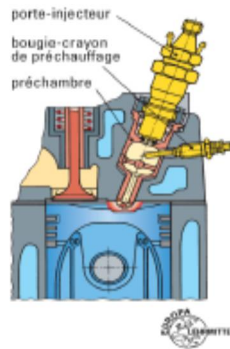


Figure 3.9 : Injection directe.

L'injecteur du type à "téton" est placé sur la culasse et dans une cavité non refroidie appelée préchambre. Elle communique avec le cylindre par un orifice à passage restreint. Le combustible injecté dans la préchambre commence à brûler du fait de l'environnement chaud. De ce fait la précombustion ayant commencé, une montée en pression se produit et expulse le mélange dans le cylindre où la combustion a lieu. Ce système permet un fonctionnement moins bruyant. Par contre, pour le démarrage à froid, l'apport d'une source de chaleur est obligatoire.

3.3.2 Moteurs à injection indirects

Les **moteurs à injection indirecte** sont actuellement largement majoritaires pour les applications aux véhicules de tourisme, du fait d'une puissance massique plus élevée, d'un système d'injection moins coûteux et de bonnes performances sur une large plage de régime. La consommation plus élevée les a progressivement fait disparaître pour les applications industrielles et les poids lourds.

Les systèmes d'injection indirecte injectent le carburant dans une **préchambre** reliée au cylindre par un canal de transfert (chambre de turbulence Ricardo) ou plusieurs orifices de communication (chambre de précombustion Mercedes). Cela crée une aérodynamique puissante qui active le mélange air-carburant sur une large plage de régime, avec un injecteur à un seul trou (injecteur à téton), sans nécessiter de très hautes pressions d'injection (400 à 500 bars).

Mais cette aérodynamique puissante présentait aussi des défauts liés pour beaucoup à l'accroissement du coefficient d'échange thermique aux parois :

- difficultés de démarrage à froid ;
- rendement moins bon ;
- nécessité d'un radiateur de refroidissement plus volumineux ;
- limitation des performances spécifiques, à cause de l'accroissement des contraintes thermomécaniques dans les matériaux des pistons et de la culasse.

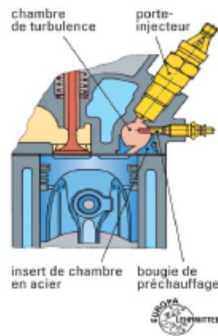


Figure 3.10 : Injection indirecte.

3.3.3 Moteurs à injection haute pression à rampe commune

C'est une version moderne du moteur diesel à injection directe. Contrairement aux systèmes à pompe distributrice, la pression d'injection est indépendante de la vitesse de rotation du moteur et demeure constante pendant la phase d'injection.

Le pilotage de l'injection par un calculateur électronique laisse une grande latitude de programmation aux motoristes.

La quantité de combustible injecté peut être fractionnée pour réaliser un pré injection, ce qui permet de réduire les bruits de combustion et la formation de *Nox*.

Cette faible quantité de carburant ($1 \text{ à } 4 \text{ mm}^3$) permet de préparer, par une augmentation de la température et de la pression dans la chambre de combustion, l'inflammation du combustible lors de l'injection principale.

Les véhicules équipés de filtres à particules présentent une phase de nettoyage qui nécessite une post-injection, rendue possible grâce au pilotage des injecteurs par un calculateur électronique. Le pilotage par une électronique numérique de tous les paramètres de l'injection permet d'optimiser le fonctionnement du moteur [LAURENT 09].

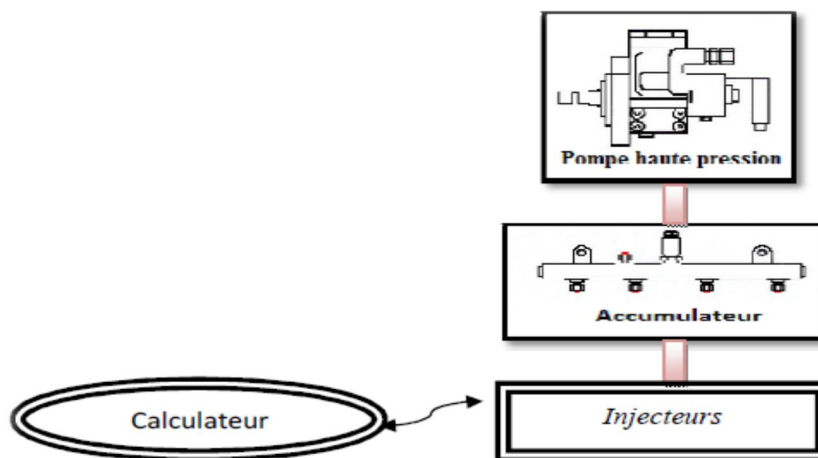


Figure 3.11 : Système d'injection haute pression à rampe commune.

3.4 Fonctionnement d'un moteur Diesel

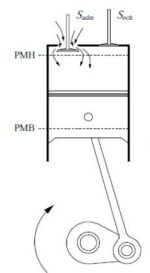
Quel que soit le type de moteur diesel le fonctionnement c'est le même, au début de chaque cycle le cylindre est rempli d'air frais. Cet air est comprimé de façon à obtenir une température supérieure à la température d'auto-inflammation du combustible.

Quand le piston est au PMH (point mort haut), le combustible liquide est injecté avec une pression suffisante pour qu'il soit très finement pulvérisé. Au contact de l'air chaud comprimé et lorsque les conditions de températures et de temps de séjour sont atteintes, le carburant s'enflamme, lors de la phase d'échappement, la soupape d'échappement ($S_{éch}$) s'ouvre pour laisser les gaz brûlés s'évacuer dans le collecteur d'échappement.

3.4.1 Le cycle à 4 temps

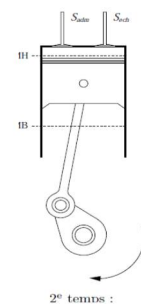
1^{ère} temps : Admission

- Piston au PMH
- Soupape d'admission S_{adm} ouverte,
- Soupape d'échappement $S_{éch}$ est fermé
- Le piston descend du PMH vers PMB.
- Le volume dans le cylindre augmente.
- La pression dans le cylindre diminue.
- La soupape d'admission S_{adm} ferme quand le piston est au PMB.



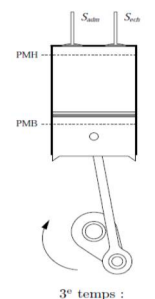
2^{ème} temps : Compression

- Les deux soupapes (S_{adm} et $S_{éch}$) sont fermées
- Le volume de la chambre de combustion diminue à mesure que le piston remonte du PMB vers le PMH
- La pression dans le cylindre augmente
- La température d'air admis augmente



3^{ème} temps : Détente

- Les deux soupapes sont fermées
- Quand le piston est au PMH, le combustible liquide est injecté sous forme fines gouttelettes
- Au contact de l'air chaud comprimé le carburant s'enflamme
- La pression des gaz dans le cylindre augmente
- Le piston est repoussé vers le bas jusqu'au PMB



4^{ème} temps : Echappement

- Le piston est au PMB.
- Le piston remonte du PMB vers le PMH.
- La soupape d'échappement s'ouvre.
- Les gaz brûlés sont évacués.

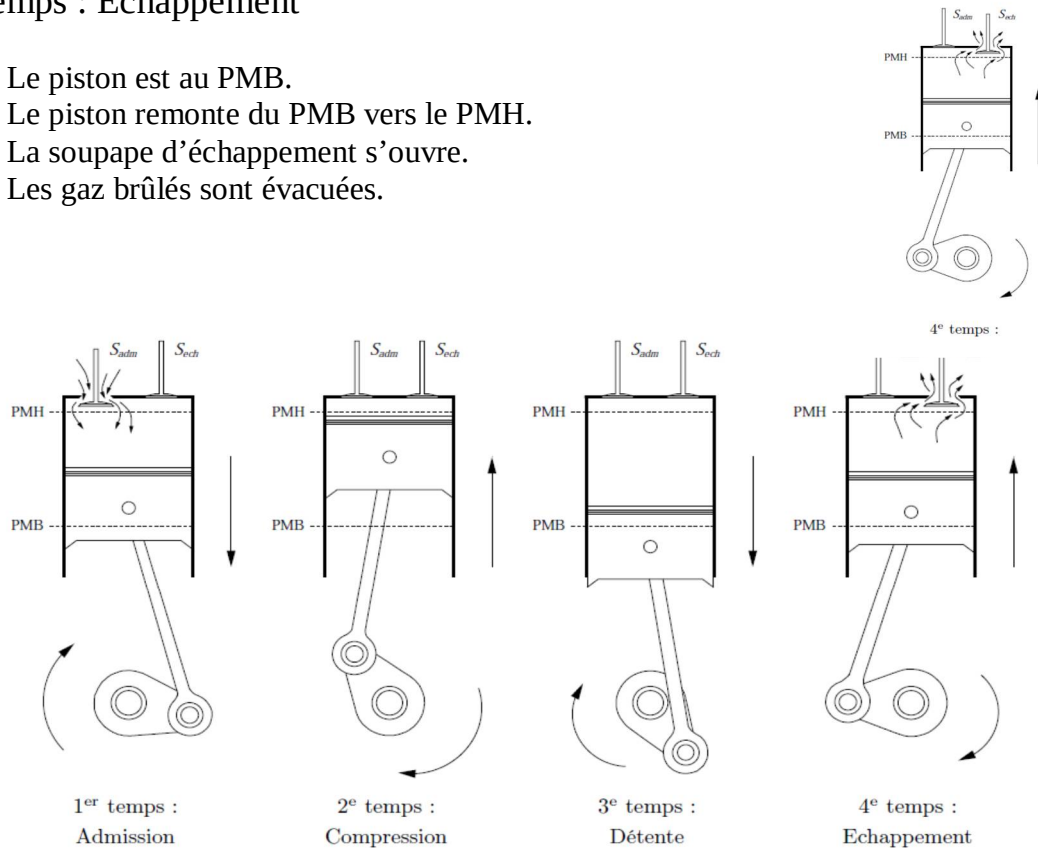


Figure 3.12 : Décomposition du cycle à quatre temps du moteur Diesel.

On représente aussi ce cycle dans le plan « Volume/Pression » (figure 3.13). Ce cycle est la combinaison de deux cycles classiques dans lesquels une partie du combustible brûle à volume constant et l'autre partie à pression constante [PEYSSON 05].

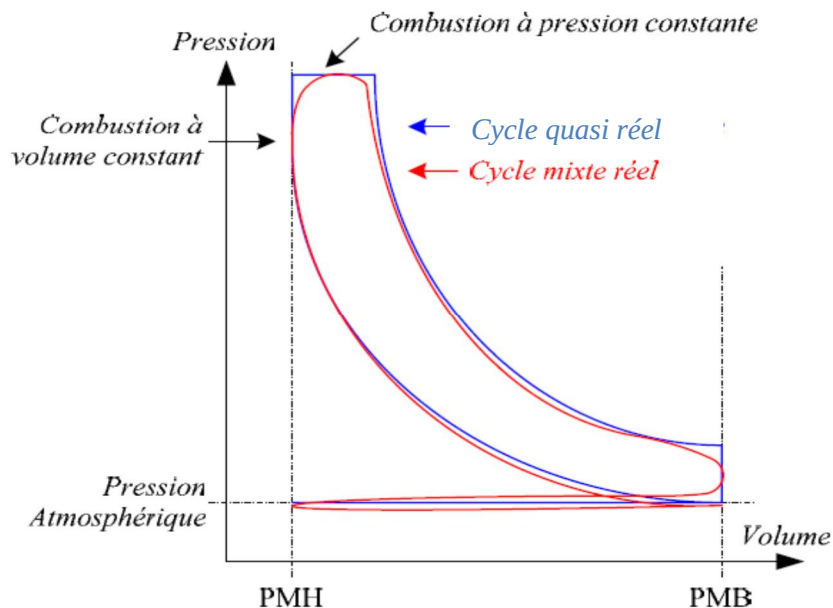


Figure 3.13 : Cycle d'un moteur Diesel.

3.4.2 Classification

3.4.2.1 Combustion

Pour générer un maximum d'énergie, avec un minimum de consommation et de rejets polluants, et un maximum de confort de conduite pour l'utilisateur, la combustion d'un moteur diesel doit être la plus complète possible.

Au fil des années, d'importantes modifications ont été apportées aux formes de chambre de combustion, aux conduits d'admission, aux matériaux employés mais aussi au processus d'injection. La chambre de combustion est d'une importance capitale pour le fonctionnement et le rendement du moteur. Plusieurs technologies sont donc employées. Il existe deux grandes familles de types de combustion [PEYSSON 05] :

- l'injection indirecte : la chambre de combustion est divisée, l'injecteur pulvérise le carburant dans une chambre auxiliaire où a lieu le début de combustion. Les gaz rejoignent ensuite la chambre principale par un canal de liaison.
- l'injection directe : la chambre de combustion n'est pas fractionnée, l'injecteur pulvérise directement le carburant dans la chambre principale du cylindre. La classe des moteurs à injection directe, peut-être divisée en deux sous-classes qui sont l'injection directe basse pression et l'injection directe haute pression aussi appelée « Common Rail ». En effet le carburant s'enflamme d'autant plus vite qu'il est injecté avec violence.

Dans une injection du type Common Rail, la pression en sortie de la pompe est indépendante de la vitesse de rotation du moteur. Des pressions jusqu'à 2000 bars peuvent être obtenues (seulement 250 à 450 bars pour une pompe classique). De plus, tous les injecteurs sont reliés au même accumulateur de pression (Rail) où une régulation de pression est implantée. Ce type d'injection permet une combustion optimisée et donc moins de pollution.

3.4.2.2 Suralimentation

Quelles que soient leurs applications, les moteurs thermiques ont les mêmes impératifs de progrès à savoir une puissance massive élevée avec une consommation minimale, une meilleure fiabilité, une réduction des émissions polluantes et une réduction de l'encombrement. La puissance d'un moteur à combustion interne est pratiquement égale au produit de la pression moyenne effective par la vitesse de rotation du moteur. Cette pression était liée au taux de remplissage en air du moteur. À faible régime, le volume d'air aspiré est pratiquement la cylindrée alors que pour une vitesse correspondant à la puissance maximale, ce volume correspond à environ 60 % de la cylindrée. Rendre un moteur plus puissant à une même vitesse de rotation est donc possible en favorisant le taux en air des cylindres. Plusieurs solutions ont été apportées :

- amélioration du remplissage au temps « aspiration »,
- multiplication du nombre des soupapes,
- modification de la géométrie des conduits d'admission,
- pré-compression de l'air ou « suralimentation » : l'air dans les cylindres est à une pression supérieure à la pression atmosphérique [PEYSSON 05].

3.4.3 Les émissions polluantes

La combustion du gazole dans un moteur Diesel génère un certain nombre de résidus. Le terme d'émissions polluantes désigne les polluants présents dans les gaz d'échappement du moteur. On y recense principalement :

Du monoxyde de carbone (CO) qui est un gaz extrêmement toxique avec une courte durée de vie. Des hydrocarbures imbrûlés, HC, provenant aussi d'une combustion incomplète.

L'oxyde d'azote, NO, dont la concentration dépend de la température de combustion.

Dans l'environnement NO et CO s'oxydent en NO₂ et CO₂ et sont donc susceptibles de réagir avec les HC imbrûlés pour former un brouillard, appelé opacité, sous l'action des ultraviolets.

L'ozone O₃ est un des principaux constituants de l'opacité. Le CO₂ n'est pas nocif et n'a pas d'effet à court terme mais c'est un gaz à effet de serre.

En résumé, les gaz d'échappement sont constitués de molécules de CO-CO₂, NO-NO₂ et HC que l'on note CO_x, NO_x et HC.

Pour limiter les émissions polluantes, l'Europe a mis en place depuis 1993, des normes Euro qui limitent la concentration en g.km⁻¹ des voitures équipées de moteur diesel.

Le tableau ci-dessous montre l'évolution de ses différentes concentrations depuis la norme EURO 1 à la norme actuelle EURO 6.

	Année	CO	HC+NO _x	NO _x	Particules
EURO 1	1993	2,72	0,97	-	0,14
EURO 2	1996	1	0,90	-	0,10
EURO 3	2000	0,64	0,56	0,50	0,05
EURO 4	2001	0,5	0,30	0,25	0,025
EURO 5	2011	0,5	0,23	0,18	0,005
EURO 6	2015	0,5	0,17	0,08	0,0045

Tableau 3.1 : Norme EURO Moteur Diesel.

Les solutions proposées pour réduire la production de polluants passent par :

- un système d'injection performant ;
- la mise en œuvre d'un catalyseur d'oxydation ;
- un système de recyclage des gaz d'échappement ;
- un filtre à particules.

3.5 Modélisation d'un moteur diesel

Dans cette partie, nous présentons un ensemble de modèles du moteur diesel avec et sans défaut à partir de la synthèse des modèles simplifiés présentés notamment dans les travaux [MOUSSA NAHIM 16], [NOHRA 09], [PEYSSON 05], [NOURA 06] et [YOUNES 93]. Cet ensemble comprend : le modèle de l'injection et de la compression avec et sans défaut, le modèle d'admission avec et sans défaut, le modèle du bloc moteur sans défaut et le modèle des émissions polluantes. Sachant que le système est complexe, les défauts d'admission, de compression et d'injection influent sur le fonctionnement du moteur et sur les émissions polluantes.

L'objectif de la construction de ce modèle est de le rendre le plus simple possible en gardant son aptitude à représenter fidèlement le comportement d'un moteur diesel à vide. Ce modèle n'inclut donc pas les technologies de suralimentation à géométrie variable et de recirculation des gaz.

3.5.1 Modèle d'injection

Le modèle d'injection consiste à prédire le débit de carburant injecté en fonction de la position d'accélération x_p et de la vitesse de rotation ω du moteur.

Il intègre une régulation du rapport $\Delta m_f / \omega$. Lorsque le conducteur accélère, il impose une valeur d'équilibre au rapport $\Delta m_f / \omega$.

Pour une position x_p constante le débit de carburant ainsi que la vitesse augmentent tant que le rapport n'atteint pas sa valeur de consigne (valeur d'accélération).

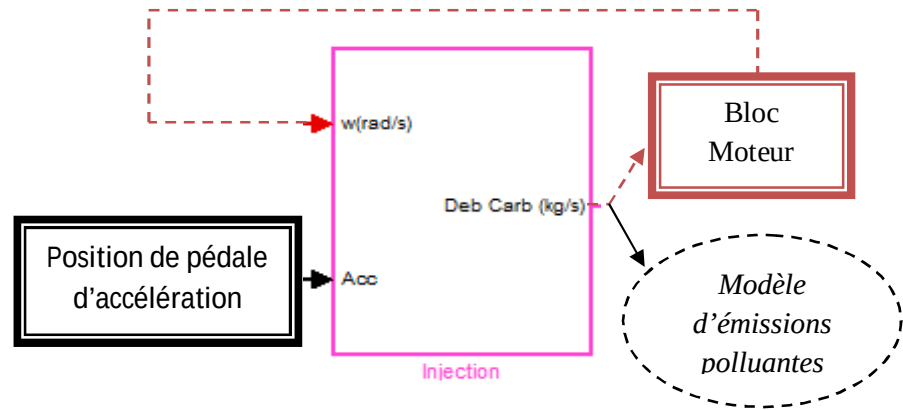


Figure 3.14 : structure du sous modèle d'injection.

Le modèle est représenté par les deux équations suivantes :

$$m_f = i_0 + \Delta m_f \quad (3.1)$$

$$\Delta m_f = \omega (i_1 + i_2 \times x_p + i_3 \times x_p^2 + i_4 \times \omega) \quad (3.2)$$

3.5.1.1 Modèle de défaut d'injection

Ce défaut traduit une diminution de l'efficacité des injecteurs (injecteurs grippés ou encrassés), et provoque une baisse de puissance de ces derniers, le débit du carburant injecté sera donc plus faible que prévu. L'équation de ce modèle est la suivante :

$$m_{fd} = (1 - k) \times m_f \quad (3.3)$$

3.5.2 Modèle d'admission

Le modèle d'admission dépend du débit soufflé par le compresseur et des débits d'air aspiré par le moteur.

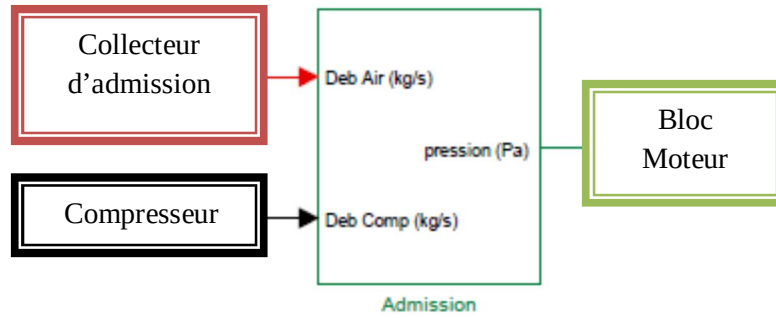


Figure 3.15 : Structure du sous modèle d'admission.

La pression d'admission p_a est calculée par la loi des gaz parfaits :

$$p_a = \frac{rT_a M_a}{V_a} \quad (3.4)$$

Dans notre étude on suppose que la température d'admission T_a est constante.

La variation de la masse d'air entrant dans le collecteur d'admission est donnée par :

$$\frac{dM_a}{dt} = m_c - m_{cyl} \quad (3.5)$$

Donc la variation de la pression d'admission est donnée par :

$$\frac{dp_a}{dt} = \frac{rT_a}{V_a} (m_c - m_{cyl}) \quad (3.6)$$

Le débit de sortie du compresseur m_c , est représenté par une relation proportionnelle au régime moteur.

$$m_c = c_m \times \omega \quad (3.7)$$

3.5.2.1 Modèle d'admission avec défaut de fuite dans le collecteur d'admission

La fuite est modélisée par un trou rond de diamètre d au niveau de l'admission, l'équation (3.6) devient :

$$\frac{dp_{ad}}{dt} = \frac{rT_a}{V_a} (m_c - m_{cyl} - m_{fuite}) \quad (3.8)$$

Le débit de fuite m_{fuite} est donné par la relation d'écoulement de Saint-Venant [PEYSSON05]:

$$m_{fuite} = \left(\pi \frac{d}{2} \right)^2 \frac{p_a}{\sqrt{rT_a}} \sqrt{\frac{2C_p}{r}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_{atm}}{p_a} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (3.9)$$

3.5.2.1 Modèle d'admission avec défaut des soupapes d'admissions

Ce défaut apparait lorsqu'il y a une diminution de l'efficacité des soupapes d'admission d'ordre $k = 20\%$ (une accumulation d'impureté peut gêner l'ouverture d'une soupape). Le débit d'air sortant de l'admission va être plus faible que le débit entrant. On le modélise par l'équation suivante :

$$m_{cyl} = (1 - k) \times m_{cyl} \quad (3.10)$$

La pression devient :

$$\frac{dp_{ad}}{dt} = \frac{rT_a}{V_a} (m_c - m_{cyl} + km_{cyl}) \quad (3.11)$$

3.5.2.2 Modèle d'admission avec défaut de compression

En fonctionnement, les ailettes du turbo compresseur peuvent s'encrasser jusqu'à casser, le compresseur perd donc de son efficacité. Lors du fonctionnement avec défaut, le débit de sortie du compresseur va donc chuter, l'équation de ce modèle est comme suit [NOURA 06]:

$$m_{cd} = (1 - k) \times m_c \quad (3.12)$$

L'équation (3.6) devient :

$$\frac{dp_{ad}}{dt} = \frac{rT_a}{V_a} ((1 - k) m_c - m_{cyl}) \quad (3.13)$$

3.5.3 Modèle du bloc moteur (solides en mouvement)

Le modèle du bloc moteur doit prendre en considération les solides en mouvement, la puissance fournie par le moteur et les puissances résistantes (frottement des pièces en mouvement, résistance de conditions de conduite) [YOUNES 06], [YOUNES 93].

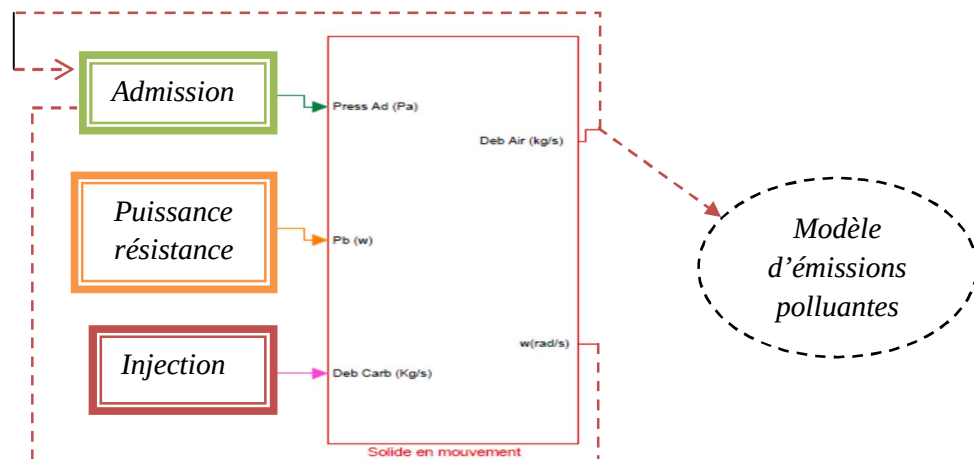


Figure 3.16 : Structure du sous modèle du bloc moteur.

Ce modèle est modélisé par l'équation de conservation d'énergie suivante :

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} J(\theta) \omega^2 \right] = P_i - P_b \quad (3.14)$$

L'équation de conservation d'énergie nous permet d'exprimer le régime moteur en fonction de la puissance indiquée et la puissance résistante, l'évolution de régime moteur est donc :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J\omega} \left(P_i - P_b - \frac{1}{2} \frac{\omega^3}{J} \Delta \right) \quad (3.15)$$

La puissance résistante P_b , et la puissance indiquée P_i fournie par le moteur sont exprimée par les deux équations suivantes :

$$P_b = C_r \times \omega \quad (3.16)$$

Dans notre étude, le couple de freinage C_r ne représente que la résistance des parties en mouvement du moteur.

$$P_i = p_{ci} \times \eta_i \times m_f \quad (3.17)$$

Avec m_f est le débit de carburant, η_i étant le rendement du bloc moteur, modélisé par l'équation (3.18) :

$$\eta_i = a_\lambda + b_\lambda \times \lambda + c_\lambda \times \lambda^2 \quad (3.18)$$

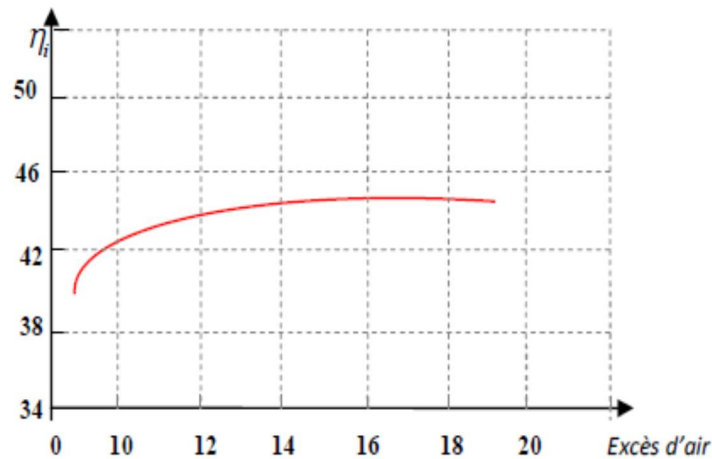


Figure 4.17 : Courbe du rendement indiqué en fonction de l'excès d'air.

L'excès d'air λ présente le rapport entre le débit d'air aspiré par les cylindres m_{cyl} et le débit du carburant m_f .

$$\lambda = \frac{m_{cyl}}{m_f} \quad (3.19)$$

Avec :

$$m_{cyl} = \frac{p_a \times \omega}{T_a} \times \frac{V_{cy} \times (\alpha_0 + \alpha_1 \times \omega + \alpha_2 \times \omega^2)}{4\pi} \quad (3.20)$$

3.5.4 Modèle des émissions polluantes

Le taux de fumée noir dans les gaz d'échappement O_p est exprimé en fonction du régime moteur, du débit de carburant et du débit d'air entrant dans les cylindres.

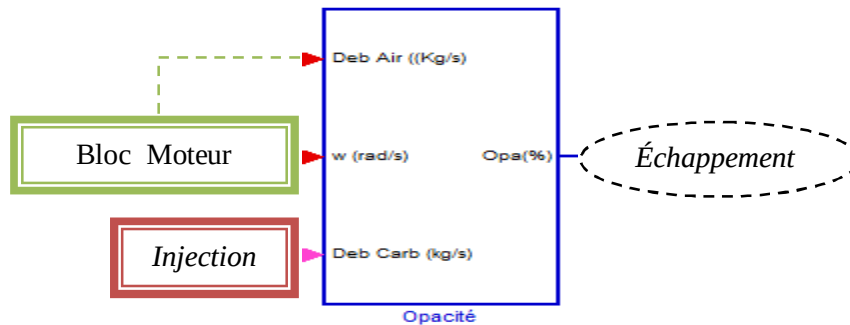


Figure 3.18 : Structure du sous modèle d'émissions polluantes.

L'équation de ce modèle est la suivante :

$$O_p = o_1 \times \omega \left(\frac{m_{cyl}}{m_f} \right)^{-o_2} \quad (3.21)$$

3.6 Simulation de modèle sans et avec défaut

Dans cette partie nous présentons l'architecture du modèle de moteur diesel sans défaut et l'architecture du modèle de moteur diesel avec défauts, ensuite nous présentons les résultats de la simulation qui montre l'évolution des différentes grandeurs.

3.6.1 Modèle moteur diesel sous l'interface Simulink de Matlab

Nous avons utilisé Matlab/simulink pour construire et simuler les différents modèles précédemment présentés.

La figure 3.19 illustre le modèle d'un moteur diesel sans défaut sous l'interface Simulink de Matlab, le modèle est composé de plusieurs sous modèles (modèle d'admission, modèle d'injection, modèle de compresseur, modèle du bloc moteur et modèle des émissions polluantes).

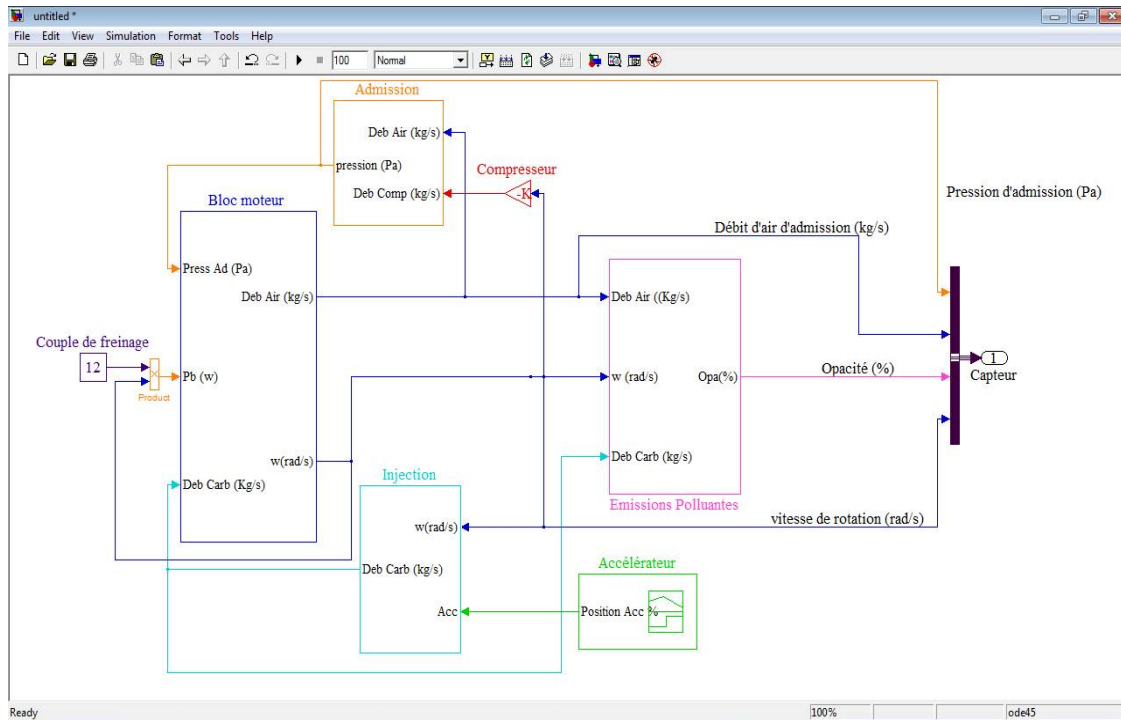


Figure 3.19 : Architecture d'un moteur diesel sans défaut dans l'interface *Simulink* de Matlab.

Le modèle de moteur diesel avec les différents défauts cités précédemment est présenté sous *Simulink* via la figure 3.20.

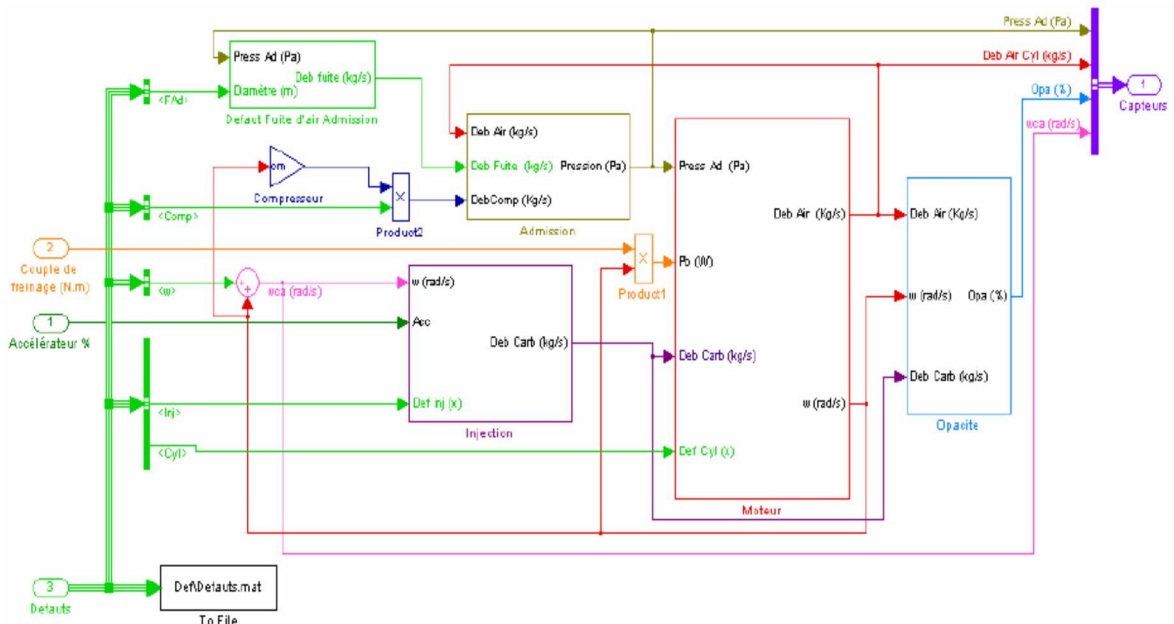


Figure 3.20 : Architecture d'un moteur diesel avec des défauts dans l'interface *Simulink* de Matlab.

La simulation dure 100s, les figures 3.21, 3.22 et 3.23 présentent respectivement l'évolution de la vitesse de rotation sans défaut et lors de l'apparition des défauts, l'évolution de la pression d'admission sans défaut et en présence des défauts et l'évolution des émissions polluantes sans défaut et avec défauts.

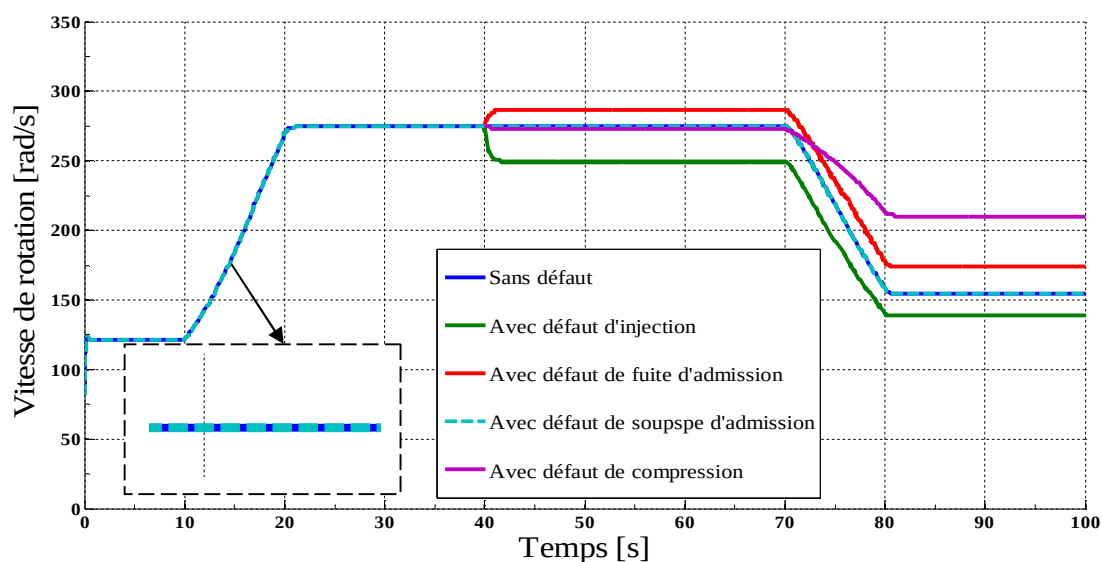


Figure 3.21 Influence des défauts sur la vitesse de rotation

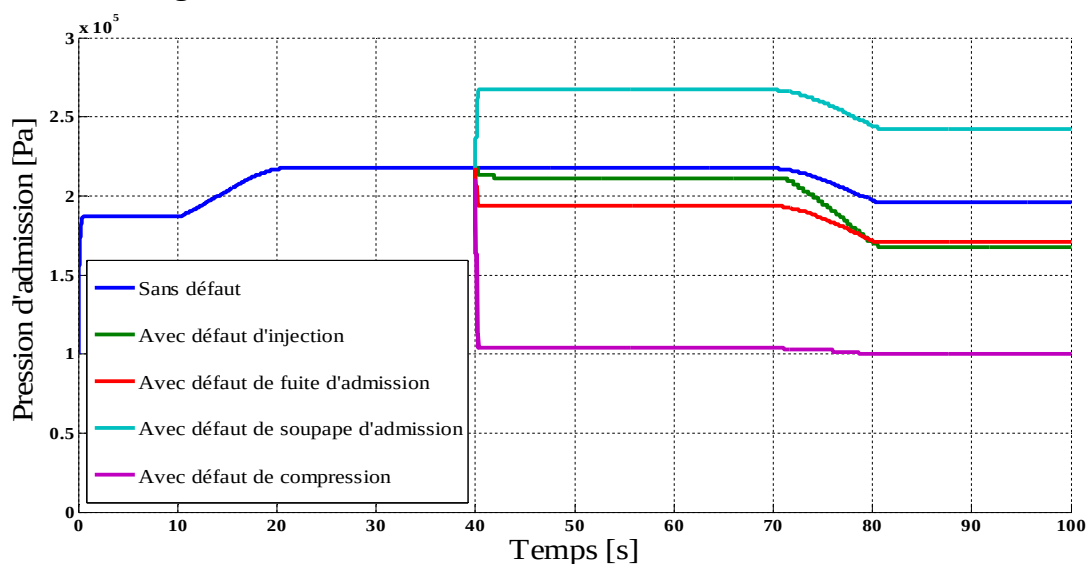


Figure 3.22 : Influence des défauts sur la pression d'admission

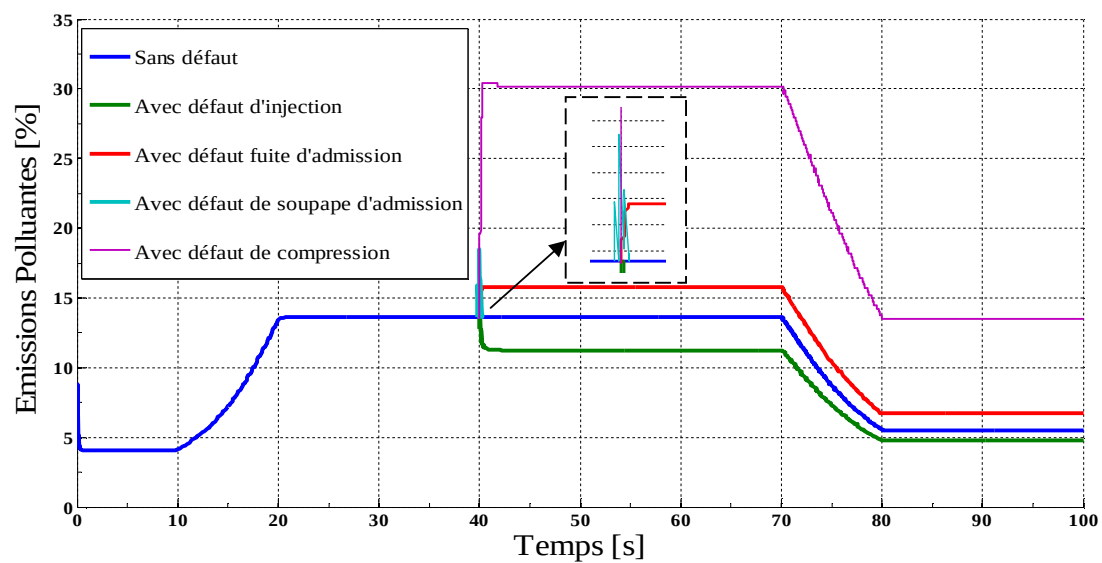


Figure 3.23 Influence des défauts sur les émissions Polluantes

La baisse de puissance et d'efficacité des injecteurs cause une diminution du carburant injecté, par rapport au débit nominal, le débit devient plus faible, cette baisse de quantité du carburant injecté fait que la vitesse de rotation (Fig.3.21) va diminuer ainsi que le débit d'air admis et le débit de compression lors de l'apparition de défaut ($t=40s$). Les émissions polluantes (Fig3.23) sont plus faibles que prévus. La pression d'admission diminue avec une très faible variation (Fig3.22) car les débits d'air aspirés par les cylindres et le débit à la sortie du compresseur restent dans le même ordre de grandeur.

La fuite d'admission agit directement sur les débits d'air aspirés par les cylindres, donc lors de l'apparition de défaut, la pression d'admission va chuter (Fig3.22). Le débit du carburant augmente ce qui entraîne une augmentation de la vitesse de rotation (Cf. Annexe1). Le mélange air carburant est donc déséquilibré, à cet effet les émissions des gaz sortants vont augmenter (Fig3.23) courbe en rouge.

La diminution de l'efficacité des soupapes d'admission d'ordre $k = 20\%$, entraîne une diminution d'air aspiré par les cylindres (équation 3.10). À cet effet, la pression d'admission va augmenter (équation 3.11) et le débit d'air aspiré revient à sa valeur nominale. La vitesse de rotation (Fig3.21) ne varie pas et on observe un pic d'émissions des gaz polluants lorsque le défaut apparaît.

Un défaut de compression entraîne une chute de pression d'admission (équation 3.12), et cette chute de pression (équation 3.13) fait varier la vitesse de rotation (Fig3.21), et la variation de vitesse va causer une augmentation des émissions polluantes (Fig3.23).

3.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, une synthèse bibliographique, montrant un état de l'art des moteurs diesel.

Un modèle simplifié d'un moteur diesel a été présenté, ainsi que les modèles des défauts pouvant l'affecter. Par la suite une simulation sous Matlab/Simulink des différents modèles présentés précédemment à permet la bonne étude des multiples influences des défauts sur le fonctionnement de moteur diesel.

CHAPITRE IV

Résultats de classification
