

NON PROTEGE

La combustion dans le diagramme décalé

INTRODUCTION

Le rendement d'une machine thermique à combustion interne est fonction de la qualité de la combustion.

La connaissance du déroulement de la combustion nécessite la détermination des lois d'évolution de la température et des constituants.

La modélisation directe et complète des phénomènes de combustion implique des calculs très lourds.

On se contentera d'une approche phénoménologique en décrivant successivement :

- Les conditions d'apparitions de la combustion ;
- Le déroulement de la combustion (diagramme décalé) ;
- L'influence des différents paramètres.

1. LES CONDITIONS D'APPARITION DE LA COMBUSTION

Pour que la combustion puisse avoir lieu, il faut :

- La présence du combustible et du comburant (**contact**) ;
- Une bonne **proportion** de carburant par rapport au comburant ;
- Une **température** suffisante (et **pression**).

1.1. Condition de contact Air/Gazole

Chaque particule de gazole doit trouver l'air nécessaire à sa combustion et pour cela le combustible est pulvérisé et réparti dans la chambre de combustion. Dans un moteur Diesel, l'injecteur (et le système d'injection : pompe et tuyau) assure ce rôle.

1.2. Condition de dosage

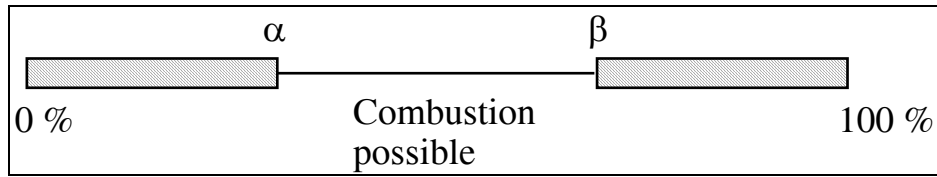
Pour que la combustion puisse se dérouler, il faut une bonne proportion de gazole par rapport à l'air (comburant).

On représente tous les mélanges possibles et cette condition de dosage à l'aide de l'axe et les valeurs α et β (limites d'inflammabilité) comme sur la figure suivante :

NON PROTEGE

NON PROTEGE

en % volume :



air pur

carburant pur

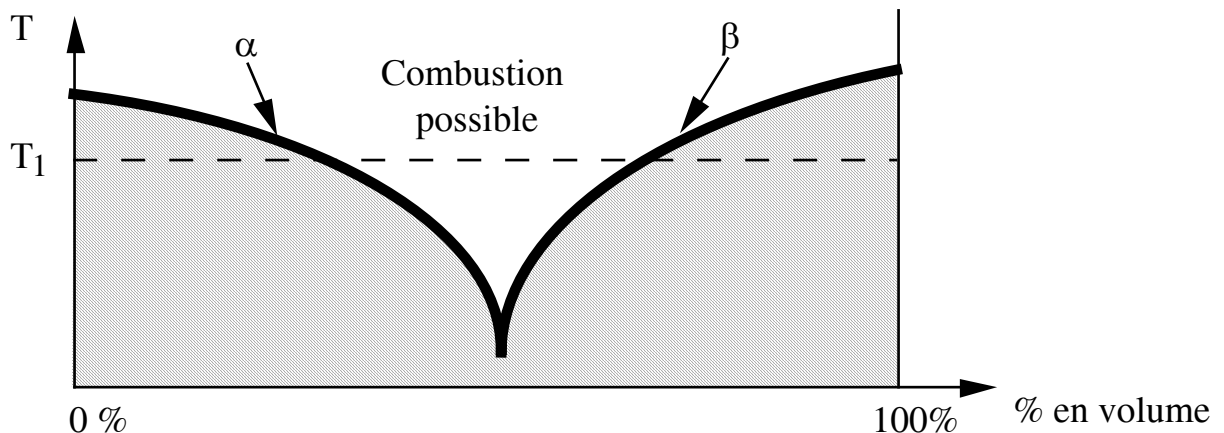
Ces valeurs α et β dépendent :

- du carburant ;
- de la pression du mélange Air/Combustible ;
- de la température du mélange Air/Combustible.

Exemple : pour une pression de 1 bar et une température de 25°C on aura les proportions en volume :

- Pour le méthane (CH_4) : $[\alpha, \beta] = [5\%, 15\%]$
- Pour l'acétylène (C_2H_2) : $[\alpha, \beta] = [2,5\%, 80\%]$

L'intervalle $[\alpha, \beta]$ est de plus en plus grand quand la température et / ou la pression augmentent.



DOMAINE D'INFLAMMABILITE

1.3. Condition de température

Pour la vaporisation du gazole et son échauffement, il est nécessaire d'apporter une quantité minimale d'énergie, ainsi on définit la température d'auto inflammation : c'est la température minimale nécessaire pour qu'il y ait auto inflammation du mélange Air/Carburant. (Initiation de la combustion).

Il faut donc : $T_{\text{mélange}} > T_{\text{auto inflammation}}$

NON PROTEGE

NON PROTEGE

La température d'auto inflammation diminue quand la pression du mélange augmente.

Exemple : le gazole

| | | | | | | |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Pression (bar) | 1 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| Température d'auto inflammation (°C) | 336 | 305 | 260 | 235 | 220 | 210 |

TEMPERATURE D'AUTO-INFLAMMATION**2. ÉTUDE DE LA COMBUSTION****2.1. Le diagramme décalé**

Pour étudier la combustion qui se déroule au voisinage du PMH, on utilise le diagramme décalé : c'est la courbe d'évolution de la pression dans le cylindre en fonction de l'angle vilebrequin α (°vilebrequin) ou le temps t (en seconde).

$$P = f(\theta)$$

$$P = g(t)$$

Il existe une relation directe entre α et t , c'est pourquoi $P = f(\theta)$ à la même allure que $P = g(t)$ à un coefficient près.

Relation entre t et θ

Soit : N , le régime de rotation en tr/min

On fait :

$$\Rightarrow 360 \times \begin{matrix} N^\circ \\ \theta^\circ \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{en } 60\text{s} \\ \text{en } t \text{ seconde} \end{matrix}$$

$$t = \frac{\alpha^\circ}{6 N}$$

Donc l'angle vilebrequin et le temps sont proportionnels.

2.2. Tracé du diagramme décaléDIAGRAMME DECALE

(courbe standard)

- 1 : Courbe de compression sans injection de combustible.
- 2 : Courbe de compression avec injection de combustible.

A Début de la course utile du piston plongeur de la pompe à injection.

NON PROTEGE

NON PROTEGE

[A, PMH] = AVANCE A INJECTION (AI) : Grandeur qui est comprise entre le début de la course utile du piston plongeur de la pompe à injection et le PMH compression du cylindre moteur correspondant.

B Début de levée de l'aiguille de l'injecteur, début d'injection dans le cylindre.

[A, B] = RETARD A L'INJECTION (r) : c'est le temps qui s'écoule entre le début de la course utile du piston plongeur et le début d'introduction du combustible dans la chambre de combustion.

Ce retard est principalement dû :

- Au temps de pré compression dans le cylindre de la pompe à injection (fuite, dilatation de la tuyauterie, compressibilité du gazole ...) ;
- Au retard à l'ouverture de l'injecteur (masse et inertie des pièces à mettre en mouvement).

Après le point B la pression croit moins vite. Cela est due à des phénomènes endothermiques (consommateurs de chaleur) tels que :

- Échauffement du gazole ;
- Vaporisation partielle du gazole ;
- Réactions du gazole au contact de l'air chaud.

(Phénomène endothermique : se dit d'une transformation qui absorbe de la chaleur)

C Auto-inflammation du gazole : début de la combustion franche.

[B, C] = LE DELAI D'INFLAMMATION (t) : c'est le temps qui s'écoule entre le début d'introduction du combustible dans la chambre de combustion et son auto inflammation, dans les conditions de pression et température de la chambre de combustion (délai du motoriste).

On admet que tout le combustible injecté entre B et C s'enflamme en masse à partir du point C, sa combustion se poursuit jusqu'au point D. D'autre part le combustible qui continu d'être introduit par l'injecteur brûle au fur et à mesure de son injection.

D Fin de la combustion de la quantité de combustible injectée pendant le délai d'inflammation [B, C].

Le point D est situé entre le PMH et la Prémax.

NON PROTEGE

NON PROTEGE

Entre les points C et D on constate une augmentation brutale de la pression.

[C, D] Correspond à la combustion isochore du cycle théorique mixte. Elle est appelée 'phase incontrôlée' de la combustion.

On définit la vivacité de la combustion et l'angle de cognement α_C par :

$$\text{tg}(\alpha_C) = \text{Vivacité} = (P_D - P_C) / (d_D - d_C)$$

L'angle α_C est appelé angle de cognement.

L'angle α_C a une influence sur le bruit et le fonctionnement mécanique du moteur.

Cet angle varie avec la quantité de combustible introduite pendant le délai d'inflammation, t .

L'angle α_C est l'angle que fait la droite passant par C et D avec une horizontale.

NOTA :

- Plus α_C est grand et plus le moteur cogne, le moteur est bruyant. A froid α_C est un peu plus grand car le délai est un peu plus long donc le moteur cogne.
- Lorsque le moteur se réchauffe ce cognement diminue jusqu'à sa valeur normale.

A partir de D, le combustible brûle avec un retard de plus en plus grand après son introduction dans la chambre de combustion. Ce retard est dû à :

- La diminution de la proportion d'oxygène dans la chambre ;
- La présence de composés faiblement oxygénés et de résidus, qui sont à combustion lente ;
- La décomposition du combustible.

La pression passe par un maxi Prémax de la combustion et va diminuer.

E Fermeture de l'aiguille de l'injecteur (fin de l'injection).

[D, E] Correspond à la combustion isobare du cycle théorique. Elle est appelée phase contrôlée de la combustion.

F Fin théorique de la combustion.

Il n'y a alors plus de combustible dans la chambre mais continuité de la réaction de combustion et du dégagement de chaleur.

Du fait de la raréfaction de l'oxygène et de l'existence d'éléments à combustion lente, la combustion se poursuit au-delà de F.

NON PROTEGE

NON PROTEGE

G Fin réelle de la combustion.

3. INFLUENCE DES PARAMETRES SUR DIAGRAMME DECALE

LA PRESSION MAXIMUM DE COMBUSTION (Prémax)

Elle est essentiellement fonction de la quantité de combustible injectée pendant le délai d'inflammation, t (70 à 135 b).

LA TEMPERATURE D'ÉCHAPPEMENT (Téchap)

Elle est essentiellement fonction de la quantité de combustible brûlée après le PMH (de 250° à 650°).

3.1. Influence du délai d'inflammation

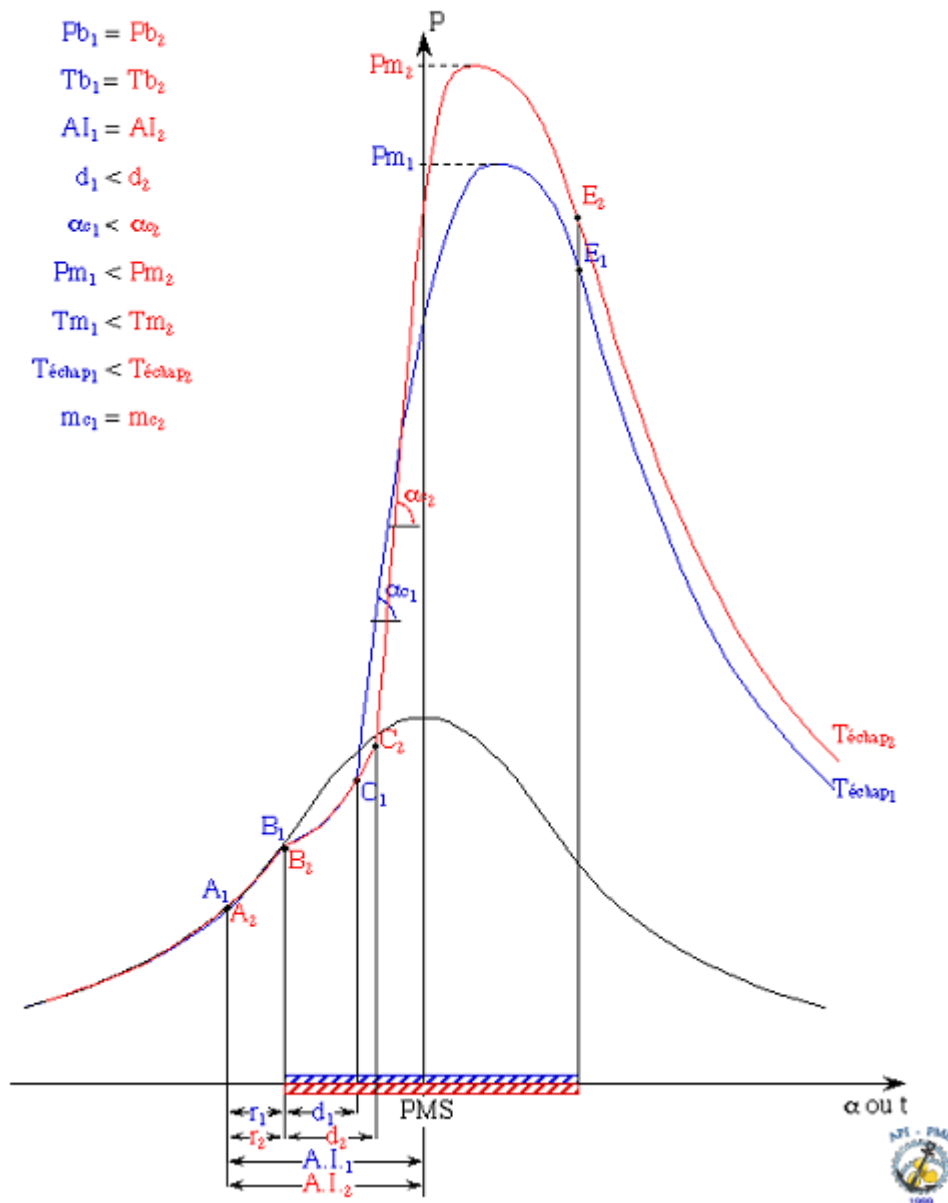
Ce délai dépend :

- de l'indice de cétane du combustible. Plus cet indice est élevé, plus le délai sera court.
- de la Pression et de la Température de l'air au moment de l'injection.
- de la turbulence qui favorise le contact air / combustible.
- de La pulvérisation : plus la pulvérisation est fine, plus le délai sera court.

[DIAGRAMME DECALE](#)

(Influence du délai)

NON PROTEGE

NON PROTEGE**Influence du délai (A.I. constante)**

Influence du délai, si t augmente :

- La masse de combustible injectée pendant le délai, m_c' , augmente.
- Auto inflammation au point **C** avec plus de combustible.
- La montée en pression est soudaine, plus brutale et plus rapide.
- l'angle de cognement \uparrow , $P_{max} \uparrow$
- $T_{échap} \uparrow$

Le cycle se décale vers l'échappement

NON PROTEGE

NON PROTEGE

Conséquences : Pour le moteur, cela se traduit par une augmentation des fatigues mécaniques et thermiques des organes.

Conclusion : D'après les paramètres que l'on observe pour un délai d'inflammation court, on comprendra l'intérêt d'utiliser des combustibles à indice de cétane fort sans dépasser 60.

3.2. Influence de l'avance à l'injection

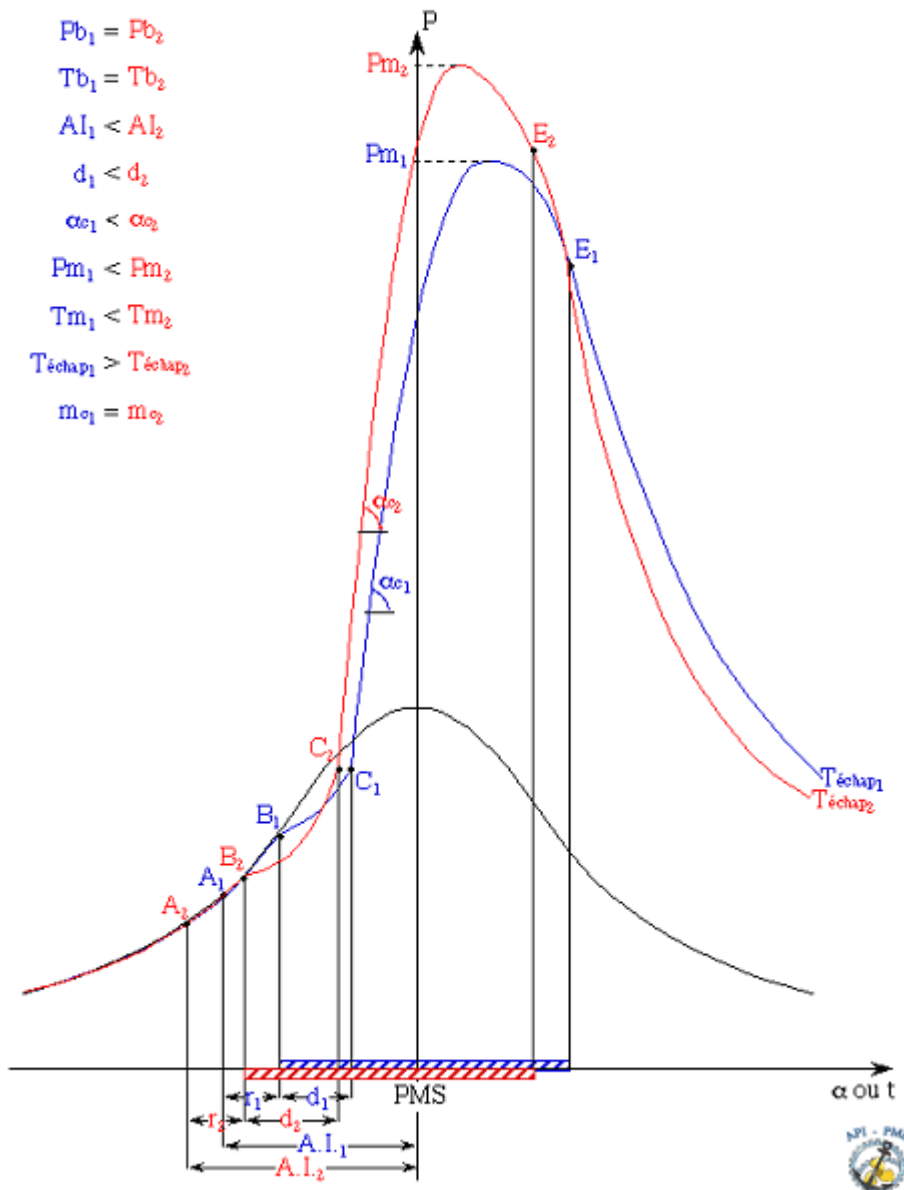
Du fait que l'injection débute plus tôt, à m_c constant, elle se poursuivra moins longtemps après le PMH et la détente débutera plus tôt, ce qui donnera **une température d'échappement plus basse**.

[DIAGRAMME DECALE](#)
(Influence de l'AI)

NON PROTEGE

NON PROTEGE

Influence de l'A.I. (m_c constante)



Conséquences: si l'AI \uparrow

- Le délai, t , \uparrow car le combustible est injecté plus tôt dans le cylindre, la température et la pression y régnant sont plus faibles.
- La masse de combustible injectée pendant le délai d'inflammation (m_c') est alors plus importante, au moment de l'auto inflammation : la combustion et l'augmentation de la pression sont plus brutales.
- l'angle de cognement \uparrow , Premax \uparrow .
- Téchap \downarrow .

NON PROTEGE

NON PROTEGE

Conséquences : Pour le moteur, cela se traduit par une augmentation des fatigues mécaniques et thermiques des organes.

Conclusion : Il est important de s'assurer des bons réglages initiaux des valeurs géométriques du moteur et de les vérifier périodiquement.

3.3. Influence de la pression et de la température en fin de compression (P_B , T_B).

Lorsque P_B et T_B augmentent le niveau thermique de fonctionnement du moteur augmente

Si P_B, T_B augmente :

- Les prémax augmentent.
- Les températures d'échappement augmentent (et inversement).

Paramètres influant sur P_B et T_B :

- La pression d'admission P_A : si $P_A \uparrow \Rightarrow P_B$ et $T_B \uparrow$
- Le rapport volumétrique de compression, ε : si $\varepsilon \uparrow \Rightarrow P_B$ et $T_B \uparrow$

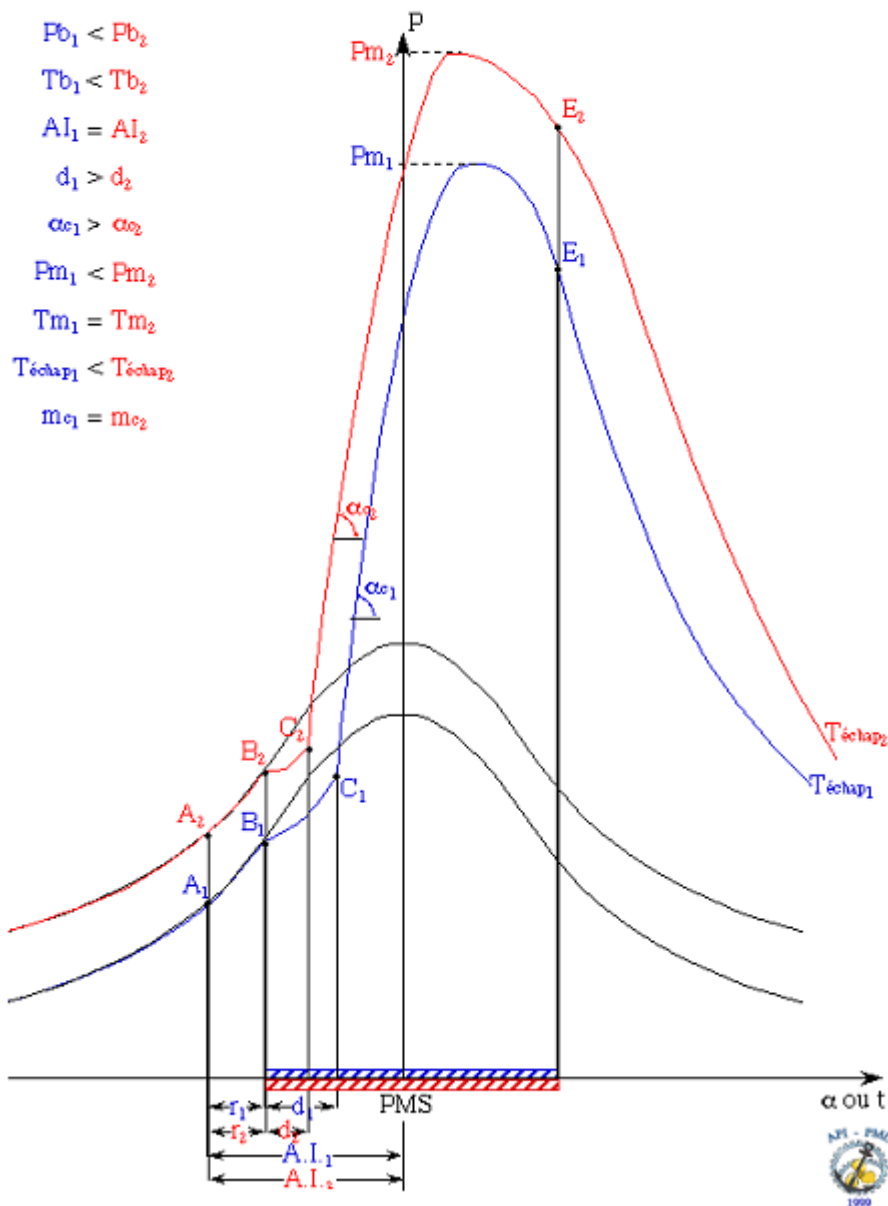
DIAGRAMME DECALE

(Influence de P_B)

NON PROTEGE

NON PROTEGE

Influence de P_B (m_c et A.I. constantes)



Si P_B augmente :

- Le retard, r , reste le même.
- Le délai, t , diminue car les conditions pression, P_B , et température, T_B , ont augmenté.
- L'angle de cognement, α_c , diminue car la combustion s'effectue loin du PMH et la quantité de gazole injecté pendant le délai, t , diminue.
- Prémax augmente car P_B augmente (la pression initiale de début de combustion est plus élevée).
- La température d'échappement augmente (la pression d'échappement aussi).

NON PROTEGE

NON PROTEGE

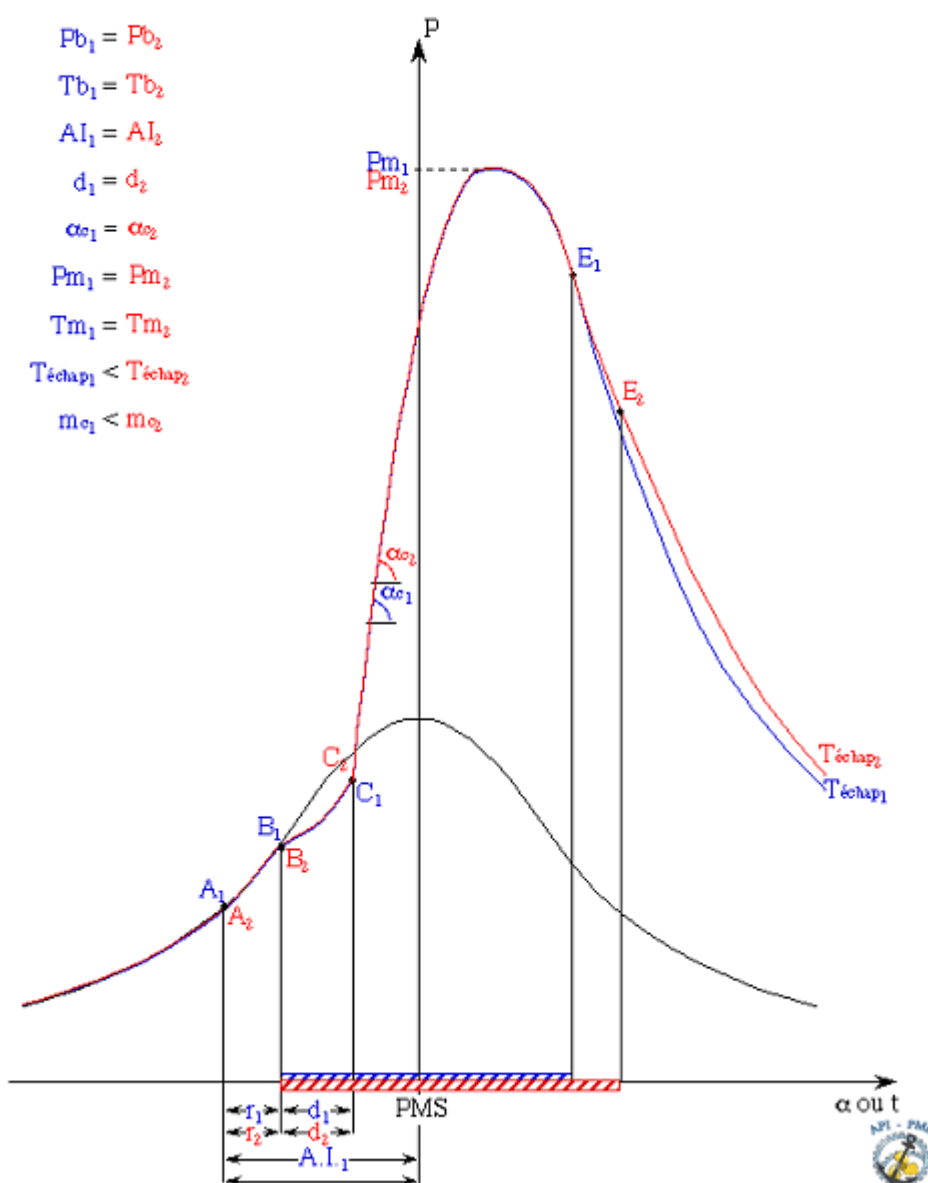
3.4. Influence de la masse de carburant injectée (m_c)

En maintenant une AI constante, le retard à l'injection, le délai d'auto inflammation, l'angle de cognement et la pression maxi sont inchangés. Dans ce cas, seul le moment de fin d'injection, point E, est modifié, faisant varier la température d'échappement.

DIAGRAMME DECALE

(Influence de m_c)

Influence de m_c (A.I. constante)



Si $m_c \uparrow$:

- l'injection se poursuit plus longtemps après le PMH
- la Température échappement \uparrow

NON PROTEGE

NON PROTEGE

Conclusion : Il est important de respecter les valeurs de conduite du moteur (cran maximal de gazole, $T_{\text{Echap...}}$)

CONCLUSION :

La combustion est un phénomène très complexe se déroulant dans un laps de temps très court.

Pour mieux appréhender la rapidité de ces phénomènes et comprendre, l'influence de l'avance à l'injection nous prendrons un exemple :

Soit un moteur Diesel 4 temps dont la vitesse de rotation est de 1200 tr/min, pour un cylindre on a :

En 1 minute il y a : $1200 \div 2 =$ **600 combustions.**

En 1 seconde il y a : $600 \div 60 =$ **10 combustions.**

On aura une combustion toute les $1/10^{\text{e}}$ de seconde

La vitesse angulaire du vilebrequin est :

$$1200 \times 360 \div 60 = \mathbf{7200^{\circ}/s.}$$

Pour une AI de $28,8^{\circ}$ la durée correspondante à 1200 tours par minute est :

$$28,8 \div 7200 = \mathbf{4/1000^{\text{e}}}$$
 de seconde.

NON PROTEGE