

## **1. LA POLLUTION AUTOMOBILE**

## **2. L'EFFET DE SERRE**

## **3. QUELQUES RÉACTIONS CHIMIQUES**

## 1. LA POLLUTION AUTOMOBILE

On accuse l'automobile de polluer l'environnement. Qu'en est-il exactement ?

### Gaz d'échappement

Quand on évoque la pollution automobile, on pense immédiatement aux gaz d'échappement. Si un moteur pouvait fonctionner avec une stœchiométrie parfaite, il ne rejetterait que de la *vapeur d'eau* et du *dioxyde de carbone* (CO<sub>2</sub>).

La vapeur d'eau (un moteur en rejette en moyenne 1 kilogramme par litre de carburant consommé) contribue à l'effet de serre<sup>(1)</sup>, même si elle est rejetée près du sol et se condense rapidement.

Par ailleurs, cette condensation entraîne une pollution thermique, puisqu'elle libère une énergie d'environ 2,3 millions de joules par kilogramme de vapeur d'eau rejetée, ce qui correspond à l'énergie cinétique d'un camion de 10 tonnes circulant à 75 km.h<sup>-1</sup>.

Le dioxyde de carbone (selon sa motorisation, un moteur en rejette entre 2,4 et 2,7 kilogrammes par litre de carburant consommé) est un gaz neutre biodégradable, ce n'est donc pas un polluant, mais c'est un gaz à effet de serre. En fait, ce sont les rejets massifs de CO<sub>2</sub> qui posent problème, du fait de l'incapacité de la nature à recycler ces énormes quantités (voir dossiers ADILCA "CO<sub>2</sub>").

Hélas, la stœchiométrie des moteurs est rarement parfaite : d'une part les mécaniques modernes sont conçues pour fonctionner avec un mélange pauvre (moteur atmosphérique) ou un excès d'air (moteur suralimenté), d'autre part les conditions de température et de pression atmosphériques sont perpétuellement changeantes, tout comme le régime du moteur et sa charge qui varient selon le parcours et les conditions de circulation. Ajoutons à cela que les quantités de carburant injectées ne sont jamais constantes puisqu'elles dépendent à la fois de l'humeur du conducteur et de la pression qu'il exerce sur l'accélérateur.

Selon les conditions d'utilisation, le moteur peut rejeter quatre types de polluants :

1. Le monoxyde de carbone (symbole chimique CO). C'est un gaz toxique, incolore et inodore. Lorsqu'il est inhalé, le monoxyde de carbone colonise les globules rouges du sang de manière irréversible<sup>(2)</sup>, annihilant ainsi leur capacité d'oxygénation des cellules de l'organisme. Cette intoxication, nommée *carboxyhémoglobine*, est toujours très grave, elle est parfois mortelle.

Le monoxyde de carbone se forme lorsque le mélange air/carburant est temporairement trop riche, par exemple à cause d'un filtre à air encrassé, d'un défaut de

tarage des injecteurs, d'une surconsommation d'huile, sous une forte accélération ou lorsque la voiture circule en altitude.

Normalement, la sonde lambda placée dans le conduit d'échappement détecte l'anomalie et corrige la richesse du mélange. Le catalyseur à oxydation fait le reste en transformant le monoxyde de carbone toxique en dioxyde de carbone inoffensif.

2. Le dioxyde d'azote (symbole chimique  $\text{NO}_2$ ). C'est un gaz de couleur rouge, suffocant et toxique, soupçonné d'être cancérigène des voies respiratoires. Par ailleurs, c'est un gaz à effet de serre bien plus puissant, par unité de masse, que le dioxyde de carbone.

Le dioxyde de carbone se forme lorsque le mélange air/carburant est temporairement trop pauvre, par réaction de l'oxygène et de l'azote de l'air. Ses propriétés chimiques en font un précurseur de l'ozone, autre gaz toxique.

Le dioxyde d'azote est traité soit par une vanne EGR qui ramène les gaz d'échappement vers l'admission, soit par un catalyseur à réduction (technologie SCR) qui, grâce à un additif à base d'ammoniac (AdBlue<sup>®</sup>), le transforme en gaz carbonique, azote et vapeur d'eau.

3. Les particules carbonées. Ces particules sont comme des "grumeaux" microscopiques qui se forment au moment où le carburant est mélangé à l'air.

Ces particules sont stoppées par le filtre à particules, si le véhicule en est muni. De nouveaux additifs incorporés aux carburants permettent de réduire ou supprimer ce phénomène avec, comme corollaire, une baisse de la consommation (exemple : TOTAL "excellium").

4. Les micro-particules. Ces micro-particules, qu'il ne faut pas confondre avec les particules carbonées, sont d'origine métallique, elles proviennent du frottement et de l'usure de certaines pièces du moteur qui, au cours de sa vie, peut perdre ainsi plusieurs dizaines de grammes d'alliages divers (cylindres, segments, paliers, coussinets, soupapes, cames, portées d'arbre à cames, etc.).

Ces micro-particules sont normalement entraînées par l'huile de graissage et recueillies dans le filtre à huile, mais une partie est évacuée directement par les gaz d'échappement, en particulier si l'étanchéité du moteur est défectueuse.

Incolores et inodores, extrêmement fines et difficiles à détecter, ces micro-particules passent au travers du filtre à particules et restent en suspension dans l'air. Elles finissent au plus profond de nos poumons et sont soupçonnées d'être cancérigènes.

## **Embrayage et freins**

Ces deux organes mécaniques ont en commun de fonctionner par frottement sec et à l'air libre. Leur usure, leur utilisation intempestive, notamment en milieu urbain (là où les démarrages, les coups de freins et les manœuvres sont les plus nombreux), ont comme conséquence des émissions massives dans l'atmosphère de nanoparticules extrêmement fines qui restent en suspension dans l'air et finissent au plus profond des poumons des citoyens.

Autrefois garnis d'amiante désormais prohibé, les embrayages et les freins modernes sont fabriqués avec des matériaux dont personne ne peut garantir l'absence de toxicité à long terme.

On estime qu'en moyenne, une voiture émet environ 1,5 kilogramme de nanoparticules chaque année, rien qu'à partir de l'embrayage et des freins, et il y a des millions de voitures en circulation...

## **Pneumatiques**

Les pneumatiques travaillent au contact du sol. En effet, c'est dans la surface de contact au sol que se créent les quatre forces nécessaires au mouvement et à la trajectoire de la voiture. Ce travail, et le glissement qui peut parfois en résulter, sont à l'origine de l'usure de la bande de roulement.

Que devient la matière ainsi prélevée ? Dans la plupart des cas, ces particules de gomme restent au contact du bitume. Les pluies les transforment ensuite en jus grisâtre qui vient polluer les eaux de ruissellement.

Mais si le glissement du pneumatique est important (patinage ou blocage de roue) et de surcroît par temps chaud et sec, de la fumée peut apparaître. C'est le signe que des micro-particules de gomme ont été émises dans l'atmosphère. Les plus fines finissent elles-aussi au plus profond de nos poumons.

On estime qu'en moyenne, une voiture disperse dans la nature environ 1,3 kilogramme de gomme chaque année, sans parler des pneus qui seront brûlés, et il y a des millions de voitures en circulation...

## **Motocyclettes**

La plupart des motocyclettes sont munies d'une transmission secondaire par chaîne qui fonctionne à l'air libre et qui entraîne une pollution spécifique. En effet, ce type de transmission exige un graissage permanent avec un lubrifiant qui se disperse dans l'environnement au fil des kilomètres.

Or ces lubrifiants contiennent des additifs hautement toxiques, notamment pour les organismes aquatiques. Une directive européenne devrait prochainement les interdire ou imposer aux constructeurs l'adoption de carters étanches.

## **Pollution sonore**

La circulation des voitures, des motos et des camions génère des nuisances sonores incessantes auxquelles il est difficile de s'habituer. Ces nuisances dépendent évidemment du nombre de véhicules à moteur en circulation, mais surtout de leur vitesse. Ce facteur est généralement sous-estimé, probablement parce que l'accroissement de bruit n'obéit à aucune loi simple.

Qu'on en juge : des mesures réalisées à l'intérieur de l'habitacle d'une Renault Vel-Satis 2.2 DCI (l'une des voitures parmi les plus silencieuses jamais produites) indiquent un bruit de 42 dB(A) au ralenti, de 62 dB(A) à 100 km.h<sup>-1</sup> et de 66 dB(A) à 130 km.h<sup>-1</sup> (*L'Automobile Magazine N°678*).

Quel sens donner à ces valeurs ? Le bruit étant exprimé à partir d'une échelle logarithmique, l'énergie acoustique double tous les 3 décibels. L'énergie acoustique à l'intérieur de cette voiture est donc 100 fois plus élevée à 100 km.h<sup>-1</sup> qu'au ralenti, et elle est encore multipliée par 2,5 entre 100 et 130 km.h<sup>-1</sup> !...

Oui, vous avez bien lu : l'énergie acoustique est, dans cet exemple, 250 fois plus forte à 130 km.h<sup>-1</sup> qu'au ralenti ! Mais heureusement, l'oreille humaine n'est pas un instrument de mesure, elle ne ressent les différences de bruit que d'une manière très subjective.

## **Pollution thermique**

Un physicien philosophe a écrit un jour que "*circuler en voiture consistait à remuer de l'air et à le chauffer !...*" Avait-il raison ?

La pollution thermique, qu'il ne faut pas confondre avec l'effet de serre, est une autre forme de pollution dont on parle peu mais qui est pourtant bien réelle. La pollution thermique désigne l'élévation inutile de la température d'un milieu dans lequel fonctionne un système destiné à fournir autre chose que de la chaleur.

Et c'est précisément le cas avec les véhicules à moteur en circulation ! Le milieu en question, c'est l'atmosphère terrestre !

En effet, la combustion du carburant libère une énergie qui apparaît sous deux formes : énergie thermique (chaleur) et énergie mécanique (mouvement). Hélas, à part chauffer l'habitacle, la chaleur du moteur ne sert à rien, il faut impérativement la disperser dans l'environnement à l'aide d'un radiateur !...

Que devient l'énergie apparue sous forme de mouvement ?

Une grande partie sert à brasser l'air au passage de la voiture (voir dossier ADILCA "aérodynamique"). Le frottement de l'air entraîne un échauffement de la carrosserie, tandis que les turbulences générées par le passage de la voiture finissent en chaleur lorsque les molécules d'air cessent de s'agiter pour retrouver leur calme.

L'autre partie, c'est l'énergie cinétique. Elle reste constante tant que la vitesse est stabilisée. Mais lorsqu'il faut arrêter la voiture, cette énergie se transforme en chaleur au niveau des freins (ou de la carrosserie en cas de collision...), si bien qu'on peut affirmer que la totalité de l'énergie libérée par la combustion d'un hydrocarbure quelconque (environ 35 mégajoules par litre) apparaît, à un moment ou à un autre, sous forme de chaleur.

Ainsi chaque véhicule à moteur en circulation peut être vu comme un réchauffeur de l'atmosphère terrestre, ce réchauffement s'ajoutant à celui généré par l'effet de serre.

Et il y a des milliards de véhicules en circulation partout dans le monde, sur terre, sur mer et dans les airs, de jour comme de nuit !...

### **Comment réduire la pollution automobile ?**

Lutter contre le gaspillage de carburant ou sa consommation inutile apparaît désormais comme un impératif majeur. Mais comment faire ?

Les constructeurs devront alléger les voitures, améliorer leurs performances aérodynamiques, ainsi que le fonctionnement des moteurs et leur rendement, tout en respectant au plus près les lois de la stœchiométrie.

Les aménageurs de la voirie devront réduire ou supprimer les causes de ralentissements inutiles (feux tricolores, carrefours giratoires, ralentisseurs, stops...), vaste programme nécessitant une refonte complète de l'actuel mode de gestion des flux de circulation<sup>(3)</sup> :

- pour passer de 30 km/h à 50 km/h, suite à un ralentissement en ville par exemple, une voiture doit consommer autant d'énergie que pour passer de 0 à 40 km/h.
- la synchronisation des feux tricolores sur les axes les plus fréquentés évite l'usure des plaquettes de freins et des pneus pour immobiliser la voiture au feu rouge, économise le carburant brûlé pendant l'attente du feu vert, supprime la sollicitation de l'embrayage au redémarrage et l'usure des pneus qui lui est associée, mais surtout : la consommation de carburant nécessaire à la remise en vitesse. C'est donc une solution à généraliser d'urgence.

De leur côté, les automobilistes devront apprendre à conduire avec modération, par exemple en évitant les démarrages puissants, les accélérations inutiles et les coups de freins tardifs.

Ce n'est pas la seule économie possible : il faudra aussi apprendre à circuler moins vite ! On sait en effet que les gains en consommation de carburant les plus significatifs sont obtenus en réduisant les vitesses pratiquées<sup>(4)</sup> :

- une voiture qui circule à 110 km/h au lieu de 130 km/h économise l'énergie nécessaire pour circuler à 69 km/h.
- un camion qui circule à 80 km/h au lieu de 90 km/h économise l'énergie nécessaire pour circuler à 41 km/h.

Mises bout à bout et multipliées par le nombre de véhicules en circulation, ces économies de carburant seront déterminantes et entraîneront une cascade d'autres économies moins visibles, au niveau des moteurs, des pneumatiques, des embrayages et des freins (sans parler des tôles froissées et des atteintes aux personnes...), et donc une réduction du gaspillage d'énergie et de la pollution globale générée par la circulation automobile.

Qu'on se le dise !

*(1) L'effet de serre lié à la présence de vapeur d'eau dans l'atmosphère provient essentiellement des nuages qui ont pour effet de confiner le rayonnement infrarouge du globe terrestre.*

*(2) Les globules rouges ont une durée de vie limitée à 120 jours.*

*(3) La remise en vitesse, autrement dit l'accélération, au sens physique du terme, est le moment où la consommation de carburant est maximale puisque le moteur doit "fabriquer" de l'énergie cinétique (voir dossier ADILCA "énergie cinétique"). Inversement, c'est quand la vitesse est stabilisée que la consommation de carburant est la plus faible.*

*(4) Adopter une vitesse modérée revient à réduire la part de l'énergie consacrée à l'agitation des molécules d'air perturbées par le passage du véhicule, la résistance de l'air augmentant comme le carré de la vitesse (voir dossier ADILCA "aérodynamique"). C'est aussi une manière de réduire l'amplitude des variations de vitesse liées aux aléas de la circulation, autre source de gaspillage d'énergie.*

**ASSOCIATION ADILCA**

[www.adilca.com](http://www.adilca.com)

\* \* \*

## 2. L'EFFET DE SERRE

Certains spécialistes du climat prévoient une élévation de la température moyenne à la surface du globe terrestre, phénomène qu'ils attribuent l'effet de serre.

### Qu'est-ce que l'effet de serre ?

L'effet de serre est un phénomène naturel qu'on peut expérimenter en laissant une voiture en plein soleil, vitres closes. L'énergie des rayons solaires, piégée à l'intérieur du véhicule, ne peut s'échapper et entraîne une augmentation de la température. C'est cela l'effet de serre.

Le même phénomène se produit à l'échelle du globe terrestre, à cause de la couche d'air qui nous entoure : le Soleil chauffe la Terre le jour, l'atmosphère l'empêche de se refroidir la nuit.

Pour mettre en évidence la réalité du phénomène, il suffit de comparer la Terre et la Lune, celle-ci étant dépourvue d'atmosphère : l'écart moyen de température entre le jour et la nuit ne dépasse pas 10°C à la surface de la Terre, alors qu'il est supérieur à 200°C à la surface de la Lune.

### Les dangers d'un réchauffement climatique

En théorie, il devrait y avoir un équilibre entre l'énergie reçue par la Terre et celle qui se disperse dans l'atmosphère, ceci devant se traduire par des écarts de températures constants. Or dans les faits, ce n'est pas le cas : on observe une lente mais régulière augmentation de la température à la surface du globe, signe que l'énergie reçue se dissipe mal et réchauffe le climat.

Quels sont les dangers d'un réchauffement climatique ? Les écosystèmes sont fragiles, ils reposent sur un équilibre entre la population, les terres cultivables, l'eau potable, l'air respirable, la lumière du soleil indispensable à la vie et la chaleur qu'elle nous apporte.

Une infime variation de la température moyenne à la surface du globe aurait sans doute des conséquences catastrophiques : fonte de la calotte glaciaire, élévation du niveau des océans, inondation des zones côtières, modifications climatiques, désertification des zones arides, famines, déplacements de populations, guerres... Bref, un vrai scénario catastrophe !

### La composition de l'atmosphère

La régulation de la température à la surface du globe dépend de la composition de l'atmosphère. L'air pur est composé d'azote (76 %), d'oxygène (23 %), et de faibles



quantités (1 %) de vapeur d'eau, de dioxyde de carbone, d'argon, de néon, d'hélium, de krypton et de xénon.

Cette composition évolue. Au fil du temps et à cause des activités humaines, l'air que nous respirons se charge de divers gaz qui viennent renforcer l'effet de serre naturel.

### **Les gaz à effet de serre**

Il y en a principalement six.

La thèse qui prévaut est que, en dehors de leur caractère polluant, ces six gaz ont la capacité d'absorber le rayonnement infrarouge émis par la Terre et que celle-ci ne peut donc plus évacuer son excédent de chaleur. Pour cette raison, ces gaz sont dits "à effet de serre".

Par ordre de concentration dans l'air, ce sont :

1. La vapeur d'eau (symbole chimique  $H_2O$ ), incolore et inodore, présente en grande quantité dans les nuages.

2. Le dioxyde de carbone (symbole chimique  $CO_2$ ), incolore et inodore, non toxique, émis en grande quantité par la respiration des êtres vivants, mais surtout par la combustion d'énergie fossile. Ce gaz est biodégradable, il est d'ailleurs indispensable à la croissance des plantes vertes (voir dossier ADILCA "CO<sub>2</sub>").

3. Le méthane (symbole chimique  $CH_4$ ), incolore et inodore, inflammable, émis par fermentations naturelles de matières organiques d'origine végétale ou animale.

4. L'oxyde nitreux (symbole chimique  $N_2O$ ), incolore et inodore, lié à l'utilisation d'engrais azotés dans les terrains agricoles.

5. Le dioxyde d'azote (symbole chimique  $NO_2$ ), de couleur rouge, toxique et irritant, gaz que l'on obtient en chauffant et en comprimant fortement de l'air.

6. L'ozone (symbole chimique  $O_3$ ), de couleur bleue, toxique et irritant, gaz qui se forme spontanément dans l'air en présence d'effluves électriques, ou lorsque la concentration en dioxyde d'azote ( $NO_2$ ) est trop élevée.

Attention : il ne faut pas confondre l'ozone indésirable, émis à la surface de la Terre à cause des activités humaines, et l'ozone utile qui apparaît spontanément dans la stratosphère (haute couche l'atmosphère située entre 20 et 40 kilomètres d'altitude), par mutation photochimique de l'oxygène atmosphérique ( $O_2$ ). Cette fameuse couche d'ozone forme un bouclier qui protège la Terre du rayonnement ultraviolet nocif émis par le Soleil.

Remarque : le méthane, l'oxyde nitreux, le dioxyde d'azote et l'ozone sont des gaz à effet de serre beaucoup plus puissants par unité de masse que le dioxyde de carbone.

## L'automobile et les gaz à effet de serre

Un moteur d'automobile qui fonctionnerait dans des conditions idéales de stœchiométrie ne rejeterait que de la *vapeur d'eau* et du *dioxyde de carbone* : environ 1,1 kilogramme de vapeur d'eau et 2,4 kilogrammes de CO<sub>2</sub> par litre d'essence consommé, environ 0,9 kilogramme de vapeur d'eau et 2,7 kilogrammes de CO<sub>2</sub> par litre de gazole consommé (voir dossier ADILCA "*combustion des carburants*")

Ces rejets ne sont pas des polluants, mais participent à l'effet de serre :

- la vapeur d'eau étant rejetée près du sol, elle se condense rapidement et se disperse dans l'environnement, sans autre effet notable qu'une pollution thermique (environ 2,3 MJ.kg<sup>-1</sup> pour le seul changement d'état).
- le dioxyde de carbone est un gaz non toxique, incolore, inodore et biodégradable, mais il est rejeté en grandes quantités, et participe à l'effet de serre. Sa concentration croissante dans l'atmosphère terrestre inquiète les spécialistes du climat.

## Les autres gaz à effet de serre

Les moteurs d'automobiles, et en particulier les moteurs diesel turbocompressés, rejettent d'autres gaz à effet de serre comme les oxydes d'azote (NO-NO<sub>2</sub>), gaz provenant de la réaction de l'oxygène avec l'azote de l'air lorsque ces moteurs fonctionnent à hautes températures avec un mélange pauvre ou avec un excès d'air (voir dossier ADILCA "NO<sub>x</sub>").

Les normes anti-pollution modernes imposent de traiter le dioxyde d'azote dans un catalyseur à réduction (technologie SCR), à l'aide d'un additif à base d'ammoniac (AdBlue®). Il se transforme alors en gaz carbonique, azote et vapeur d'eau.

Les automobiles n'émettent que de faibles quantités d'ozone (O<sub>3</sub>) provenant de l'utilisation d'accessoires électriques (alternateur, moto-ventilateur...), mais cette pollution, renforcée par la présence de dioxyde d'azote, est redoutable car ces deux gaz combinent leurs effets : ce sont de puissants toxiques irritants pour les yeux, la gorge et les poumons.

## Conclusion

L'automobile est directement responsable de l'émission de deux gaz à effet de serre : du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) en grande quantité et, dans une moindre mesure, du dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>). Indirectement, l'automobile contribue aussi à la présence d'ozone (O<sub>3</sub>) dans l'atmosphère terrestre.

Finalement, la pollution automobile peut se résumer ainsi : une voiture fabriquée à la fois de la chaleur et les gaz à effet de serre qui l'empêchent de se disperser.

### 3. QUELQUES RÉACTIONS CHIMIQUES

#### Masse molaire des principaux éléments (kg.kmol<sup>-1</sup>) :

hydrogène (H) : 1  
carbone (C) : 12  
azote (N) : 14  
oxygène (O) : 16

#### Masse volumique des corps en présence (kg.m<sup>-3</sup> à 273 K et 1013 hPa) :

diazote (N<sub>2</sub>) : 1,25  
dioxygène (O<sub>2</sub>) : 1,43  
dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) : 1,96  
eau (H<sub>2</sub>O) : 1 000  
gazole : 845  
essence : 760  
GPL : 550

#### Formule chimique de l'air pur (gaz rares assimilés au diazote) :

composition massique de l'air : dioxygène (O<sub>2</sub>) 23 % ; diazote (N<sub>2</sub>) 77 %

- masse molaire du dioxygène : 16 x 2 = 32 kg
- masse d'air contenant une kilomole de dioxygène : (32 / 23) x 100 = 139 kg
- masse de diazote correspondante : 139 – 32 = 107 kg
- masse molaire du diazote : 14 x 2 = 28 kg
- coefficient du diazote : 107 / 28 = **3,8**

formule chimique de l'air pur : **O<sub>2</sub> + 3,8 N<sub>2</sub>**

#### Formule chimique du gazole :

composition massique du gazole : carbone (C) 87 % ; hydrogène (H) 13 %

indice du carbone : 87 / 12 = **7,25** ; indice de l'hydrogène : 13 / 1 = **13**

formule chimique : **C<sub>7,25</sub>H<sub>13</sub>**

#### Formule chimique de l'essence :

composition massique de l'essence : carbone (C) 84 % ; hydrogène (H) 16 %

indice du carbone : 84 / 12 = **7** ; indice de l'hydrogène : 16 / 1 = **16**

formule chimique :  $C_7H_{16}$

**Formule chimique du GPL :**

composition du GPL : butane ( $C_4H_{10}$ ) 50 % ; propane ( $C_3H_8$ ) 50 %

formule chimique approchée :  $C_{3,5}H_9$

**Combustion du gazole :**



$C_{7,25}H_{13}$  : gazole

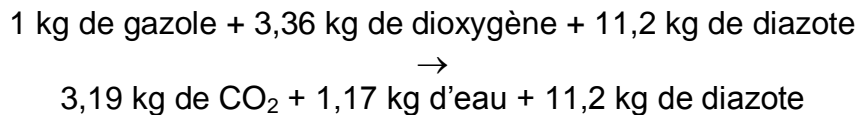
$O_2$  : dioxygène

$N_2$  : diazote

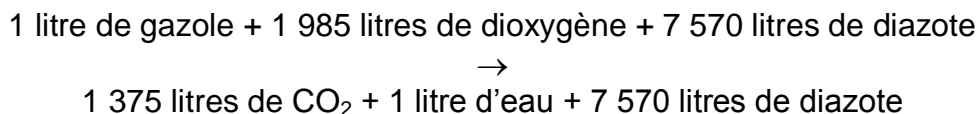
$CO_2$  : dioxyde de carbone

$H_2O$  : eau

À partir de la masse molaire de chaque élément présent dans la réaction, on obtient les proportions suivantes :



À partir de la masse volumique de chaque corps intervenant dans la réaction, on obtient les proportions suivantes :



**Combustion de l'essence :**



$C_7H_{16}$  : essence

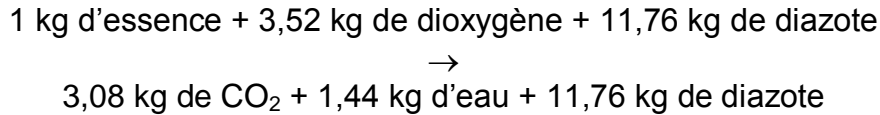
$O_2$  : dioxygène

$N_2$  : diazote

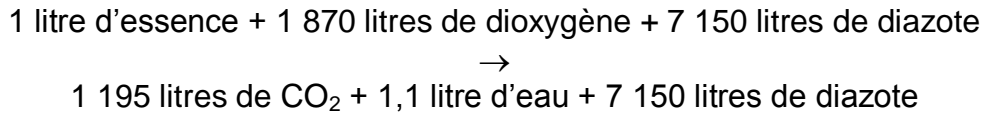
$CO_2$  : dioxyde de carbone

$H_2O$  : eau

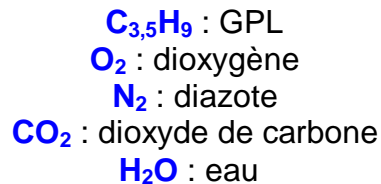
À partir de la masse molaire de chaque élément présent dans la réaction, on obtient les proportions suivantes :



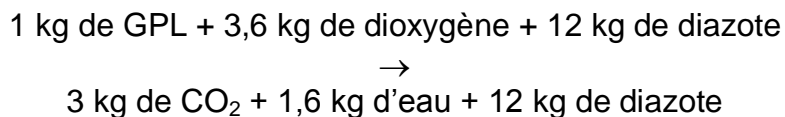
À partir de la masse volumique de chaque corps intervenant dans la réaction, on obtient les proportions suivantes :



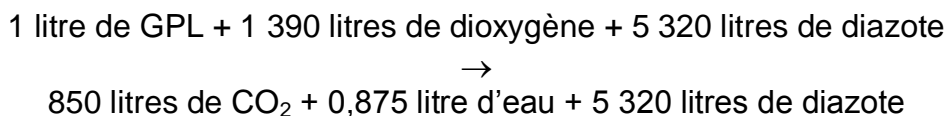
### Combustion du GPL :



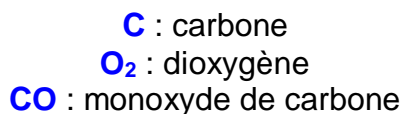
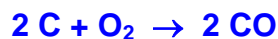
À partir de la masse molaire de chaque élément présent dans la réaction, on obtient les proportions suivantes :



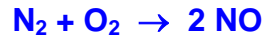
À partir de la masse volumique de chaque corps intervenant dans la réaction, on obtient les proportions suivantes :



### Formation de monoxyde de carbone :



**Formation de monoxyde d'azote :**



$\text{N}_2$  : diazote

$\text{O}_2$  : dioxygène

$\text{NO}$  : monoxyde d'azote

**Formation de dioxyde d'azote :**



$\text{NO}$  : monoxyde d'azote

$\text{O}_2$  : dioxygène

$\text{NO}_2$  : dioxyde d'azote

**Formation d'ozone :**



$\text{O}_2$  : dioxygène

$\text{O}_3$  : ozone

**Énergie brute libérée par la combustion du carburant :**

Gazole : **44,3 MJ.kg<sup>-1</sup>** (**37,4 MJ.l<sup>-1</sup>**)

Essence : **46,9 MJ.kg<sup>-1</sup>** (**35,6 MJ.l<sup>-1</sup>**)

GPL : **48,7 MJ.kg<sup>-1</sup>** (**26,8 MJ.l<sup>-1</sup>**)

**Énergie nette libérée par la combustion du carburant :**

Gazole : **41,7 MJ.kg<sup>-1</sup>** (**35,2 MJ.l<sup>-1</sup>**)

Essence : **43,7 MJ.kg<sup>-1</sup>** (**33,2 MJ.l<sup>-1</sup>**)

GPL : **45,1 MJ.kg<sup>-1</sup>** (**24,8 MJ.l<sup>-1</sup>**)