DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

LES TP DU CEA

Corrigé

Mesurer le dioxyde de carbone atmosphérique



Table des matières

MESURER LE DIOXYDE DE CARBONE ATMOSPHÉRIQUE (CORRIGÉ)

L'Île Amsterdam 3

- **Activité 1.1 :** Localisation 3
- **Activité 1.2 :** Périodicité des mesures 4
- **Activité 1.3 :** Tracé de la courbe 4
- **Activité 1.4 :** Trois périodes – trois courbes 5
- **Activité 1.5 :** Approche polynomiale 7
- **Activité 1.6 :** Évolution du taux de CO_2 8

Mauna Loa 9

- **Activité 2.1 :** Localisation 9
- **Activité 2.2 :** Périodicité des mesures 10
- **Activité 2.3 :** Tracé de la courbe 10
- **Activité 2.4 :** Trois périodes – trois courbes 12
- **Activité 2.5 :** Approche polynomiale 14
- **Activité 2.6 :** Amplitude des oscillations annuelles 17

Mace Head 18

- **Activité 3.1 :** Localisation 18
- **Activité 3.2 :** Tracé de la courbe 19
- **Activité 3.3 :** Vent d'Est, vent d'Ouest 21

Produit par : CEA / Direction de la Communication / Service Édition Événements

Auteurs : François Saint-Jalm, Professeur de Physique - Chimie à l'Éducation Nationale
et Marc Delmotte, Ingénieur de Recherche au Laboratoire des Sciences du Climat (CEA/CNRS)

Conception graphique : Lucille Colombel, CEA / Direction de la Communication
Image couverture : AGAGE

MESURER LE DIOXYDE DE CARBONE ATMOSPHÉRIQUE

CORRIGÉ

L'Île Amsterdam

■ Activité 1.1. Localisation

L'Île Amsterdam se trouve au beau milieu de l'Océan Indien. Sa localisation est la suivante : Latitude 38° 43' 00" S ; Longitude : 77° 31' 00" E. L'altitude de la station est d'une centaine de mètres.

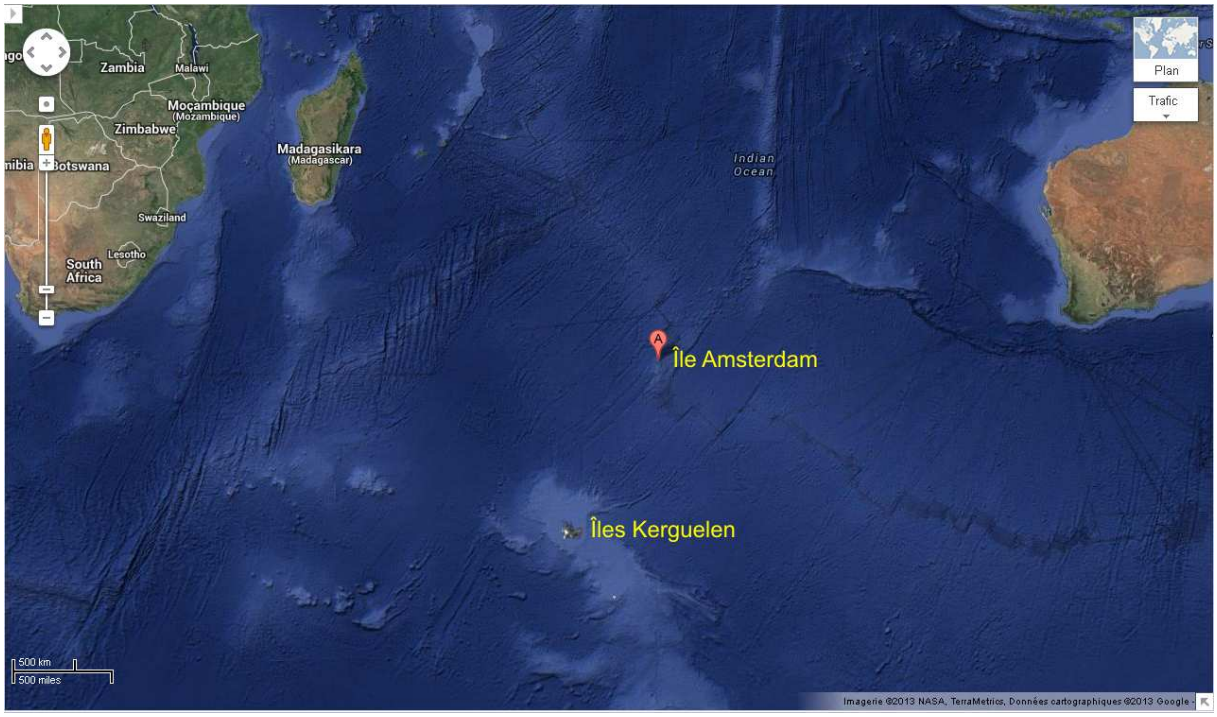


Figure 1 : *Localisation de l'Île Amsterdam*
Image : Google Maps

Cette île est dominée par les vents d'Ouest et se situe au nord de la « convergence antarctique ». La température varie entre 26 °C en été et 11,5 °C en hiver.

Acitvité 1.2. Périodicité des mesures

Les mesures reportées dans la colonne B de la feuille « Mesures » sont les moyennes mensuelles des mesures faites à la station.

Activité 1.3. Tracé de la courbe

On consultera avec profit le fichier Excel « Île Amsterdam – corrigé ».

- La courbe obtenue est la suivante :

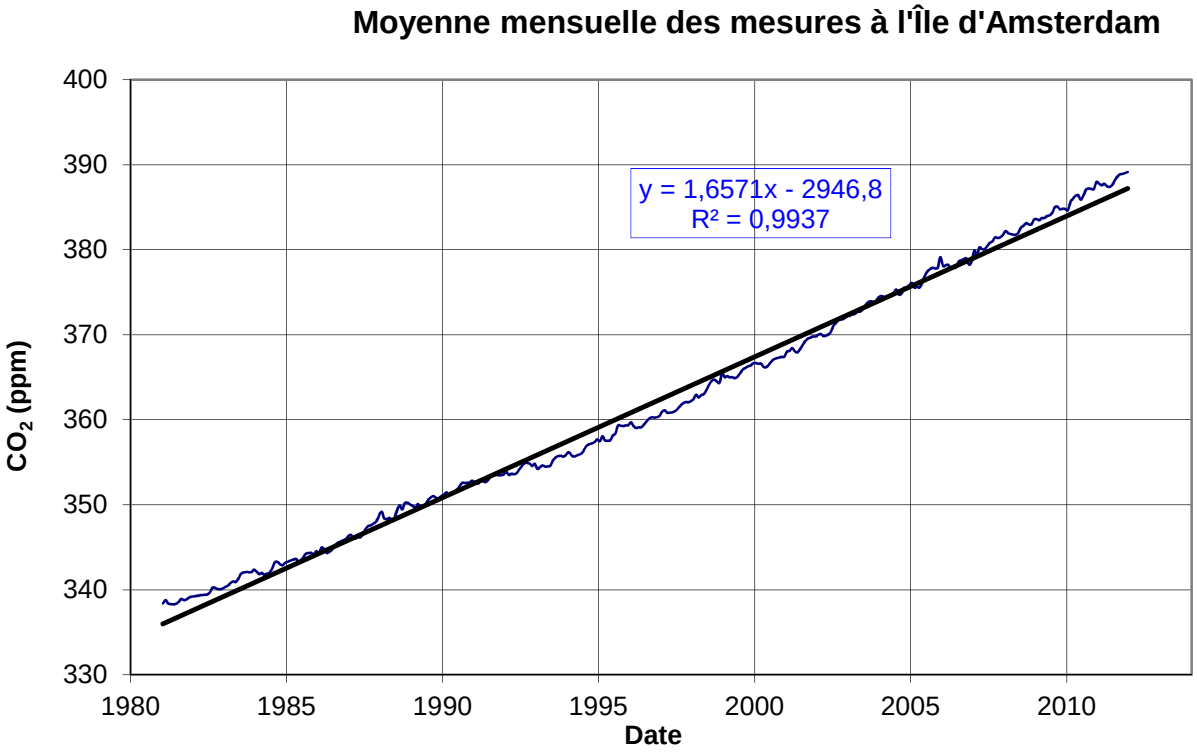


Figure 2 : *Concentration en CO_2 à l'Île Amsterdam*
Image : François Saint-Jalm (CEA)

- L'équation de la droite de régression est : $\boxed{C_{CO_2} = 1{,}657\ \text{ppm/an} \times t - 2946{,}8\ \text{ppm}}$. Elle n'a de sens qu'entre les années 1981 et 2012. Le coefficient de détermination est : $R^2 = 0{,}9937$, ce qui signifie que les valeurs prises en compte sont peu dispersées autour de la droite tracée.
- La vitesse moyenne à laquelle la concentration évolue est donnée par le coefficient directeur de la droite. C'est une augmentation de 1,657 ppm/an.
- On peut remarquer que les points mesurés se trouvent au-dessus de la droite de régression pour les dates extrêmes et en dessous pour les dates médianes. Cela signifie

que la courbe des températures ressemble à une courbe dont la concavité est tournée vers le haut.

Activité 1.4. Trois périodes – trois courbes

- On obtient les trois courbes suivantes :

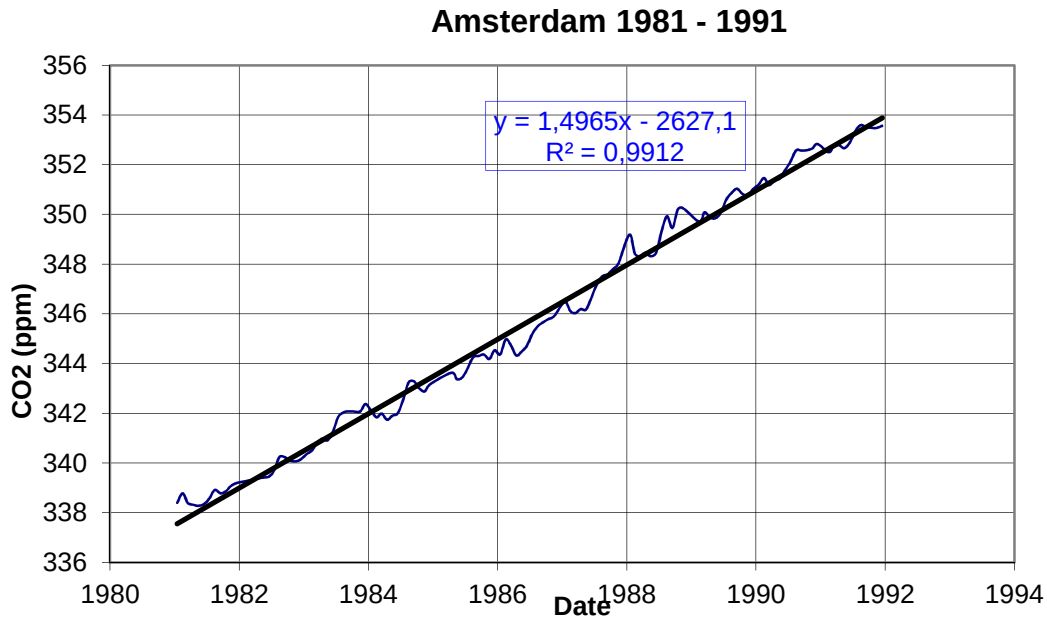


Figure 3 : *Amsterdam de 1981 à 1991.*
Image : François Saint-Jalm (CEA).

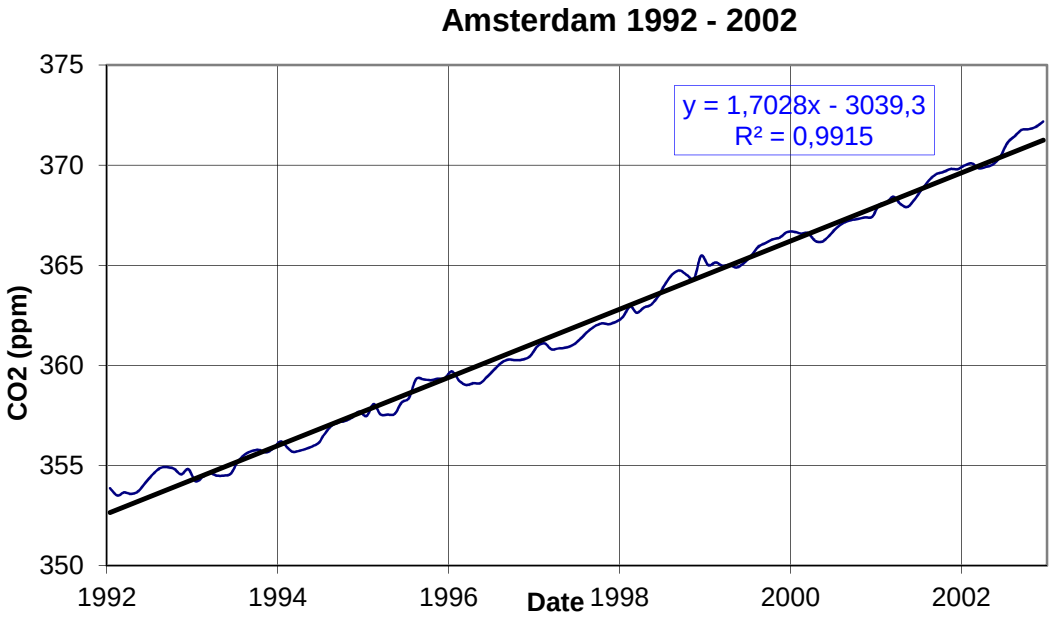


Figure 4 : *Amsterdam de 1992 à 2002.*
Image : François Saint-Jalm (CEA).

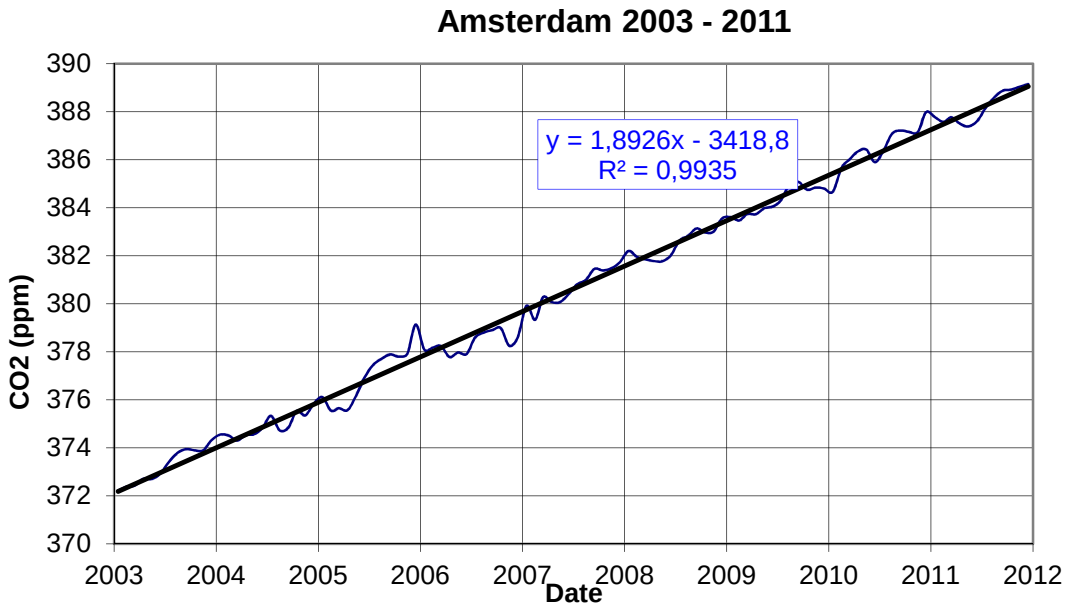


Figure 5 : *Amsterdam de 2003 à 2011.*
Image : François Saint-Jalm (CEA).

Les équations demandées sont :

Période	Équation de la droite	Coefficient de détermination
1981 – 1991	$C_{CO_2} = 1,4965\ \text{ppm/an} \times t - 2627,1\ \text{ppm}$	$R^2 = 0,9912$
1992 – 2002	$C_{CO_2} = 1,7028\ \text{ppm/an} \times t - 3039,3\ \text{ppm}$	$R^2 = 0,9915$
2003 - 2011	$C_{CO_2} = 1,8926\ \text{ppm/an} \times t - 3418,8\ \text{ppm}$	$R^2 = 0,9935$

On peut arrondir les valeurs reportées selon l'usage qu'on souhaite en faire :

Période	Équation de la droite
1981 – 1991	$C_{CO_2} = 1,50\ \text{ppm/an} \times t - 2627\ \text{ppm}$
1992 – 2002	$C_{CO_2} = 1,70\ \text{ppm/an} \times t - 3039\ \text{ppm}$
2003 - 2011	$C_{CO_2} = 1,90\ \text{ppm/an} \times t - 3419\ \text{ppm}$

- On constate que si la concentration en CO_2 augmente, sa vitesse d'augmentation augmente également. En clair, la concentration en CO_2 de l'atmosphère au niveau de l'Île Amsterdam augmente de plus en plus vite. La méthode utilisée pour le montrer n'est pas très fine, mais elle permet de donner une estimation de l'accélération du phénomène :

$$a = \frac{1{,}8926\ \text{ppm/an} - 1{,}4965\ \text{ppm/an}}{2007\ \text{ans} - 1986\ \text{ans}} \quad \Rightarrow \quad \underline{a = 0{,}01886\ \text{ppm}\cdot\text{an}^{-2}}$$

Les calculs ont été faits avec les valeurs non arrondies, mais on peut arrondir le résultat : $a = 0{,}019\ \text{ppm}\cdot\text{an}^{-2}$.

Activité 1.5. Approche polynomiale

On obtient la courbe suivante :

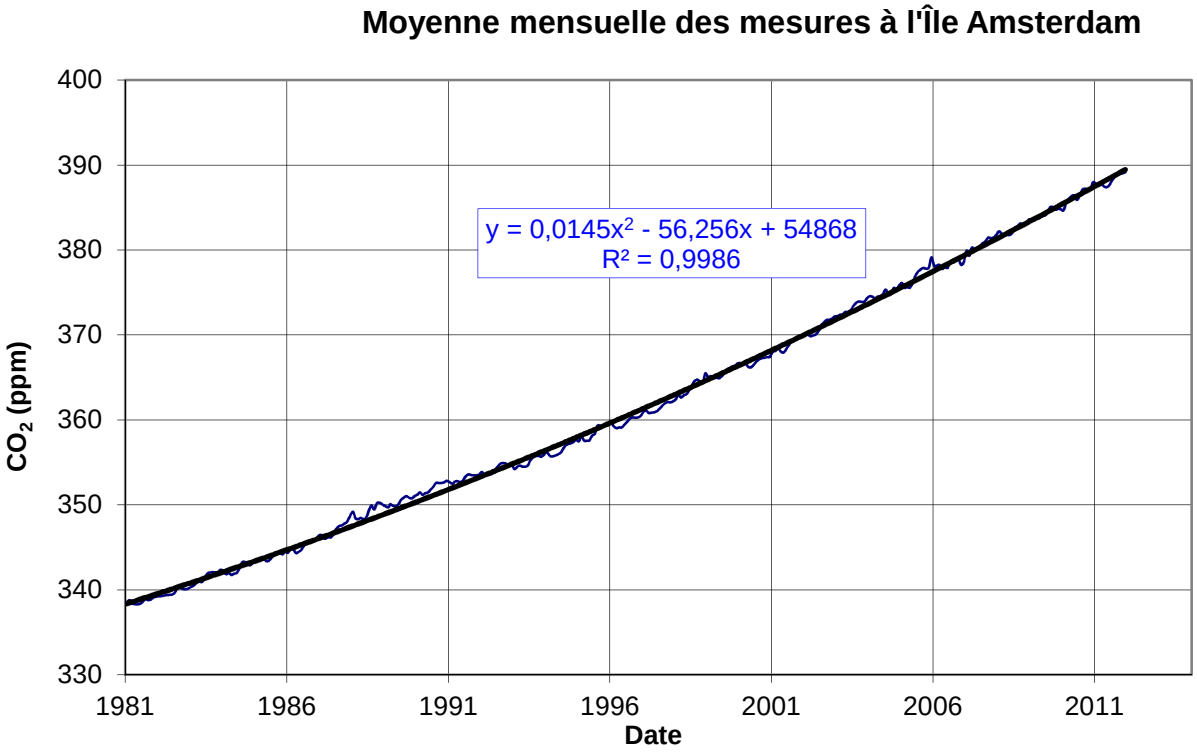


Figure 6 : *Concentration en CO_2 à l'Île Amsterdam. Régression polynomiale.*
Image : François Saint-Jalm (CEA)

La courbe tracée semble correcte. Son équation est :

$$C_{CO_2} = 0{,}0145\ \text{ppm}\cdot\text{an}^{-2} \times t^2 - 56{,}256\ \text{ppm}\cdot\text{an}^{-1} \times t + 54868\ \text{ppm}$$

En suivant la méthode conseillée dans l'énoncé, on obtient (voir feuille « Recherche de l'équation ») la courbe suivante :

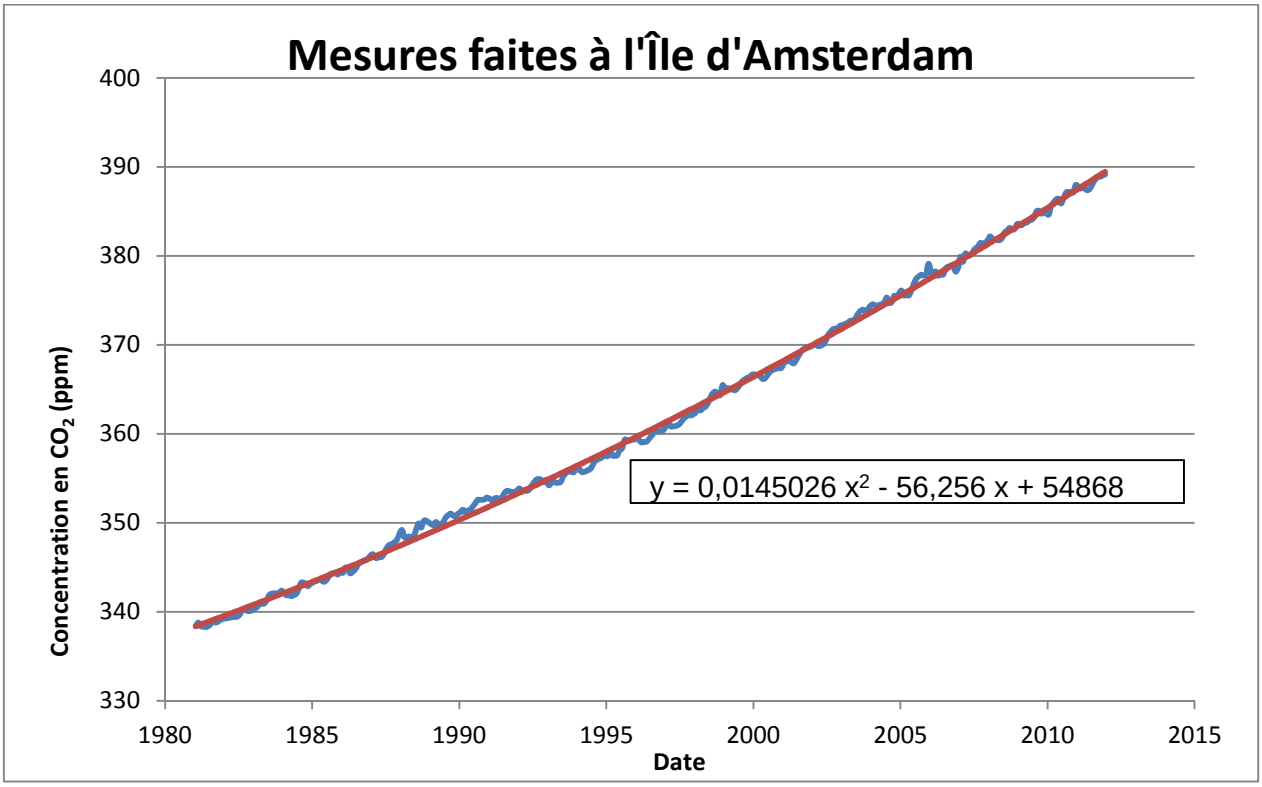


Figure 7 : *Concentration en CO_2 à l'Île Amsterdam. Approximation par Solveur. Image François Saint-Jalm (CEA).*

L'équation de la courbe est pratiquement la même que précédemment :

$$C_{CO_2} = 0,0145026\ \text{ppm}\cdot\text{an}^{-2} \times t^2 - 56,256\ \text{ppm}\cdot\text{an}^{-1} \times t + 54868\ \text{ppm}$$

Activité 1.6. Évolution du taux de CO_2

- La vitesse d'augmentation de la concentration en CO_2 est la dérivée par rapport au temps de l'équation que nous venons d'obtenir. C'est donc :

$$v = 0,029\ \text{ppm}\cdot\text{an}^{-2} \times t - 56,256\ \text{ppm/an}$$

- On obtient ainsi pour les trois années demandées :

	Vitesse d'augmentation de la concentration en CO_2
1987	1,39 ppm/an
2000	1,77 ppm/an
2010	2,06 ppm/an

- Remarque : Se pose ici le problème du système de numération des années qui est tel que l'indication « 1987 », par exemple, désigne toute l'année 1987. En revanche, le repérage de la date de chaque mesure se fait grâce à une indication décimale. Ainsi, dans l'équation que nous avons obtenue, l'indication « 1987 » désigne le début de l'année 1987. On peut donc se dire que si l'on souhaite avoir une information concernant toute l'année 1987, il est plus sage de faire le calcul à la date « 1987,5 ». C'est ce qui a été fait ici.

- L'accélération de l'augmentation du taux de dioxyde de carbone est égale au coefficient directeur de la droite $v(t)$. C'est donc : $a = 0{,}029\ \text{ppm}\cdot\text{an}^{-2}$. On trouve une valeur sensiblement supérieure à celle qui avait été obtenue par la première approche. Ce résultat montre que non seulement la concentration en dioxyde de carbone augmente, mais aussi que cette augmentation est de plus en plus rapide : le phénomène s'aggrave.

Mauna Loa

Activité 2.1. Localisation

La station de Mauna Loa se trouve à Hawaï au sommet d'un volcan actif. C'est le plus grand volcan émergé du Monde. Sa situation géographique est donnée par : Latitude : 19°28' 30" N ; Longitude : 155°36' 29" W. Cette station se situe en altitude (4170 m) et au milieu de l'Océan Pacifique.



Figure 8 : *Localisation de la station de Mauna Loa.*
Image : Google Maps.

Le point commun avec l'Île Amsterdam est de se trouver à l'écart des terres émergées.

Les différences principales sont les suivantes :

- Mauna Loa est dans l'hémisphère Nord quand Amsterdam est au Sud.
- Mauna Loa est en altitude quand Amsterdam est pratiquement au niveau de la mer.

Acitvité 2.2. Périodicité des mesures

- La périodicité des mesures est la même que pour l'Île d'Amsterdam : il s'agit de moyennes mensuelles qui sont reportées au 15 de chaque mois.

Activité 2.3. Tracé de la courbe

- On consultera avec profit le fichier Excel « Mauna Loa – Corrigé ».
- La courbe obtenue est la suivante :

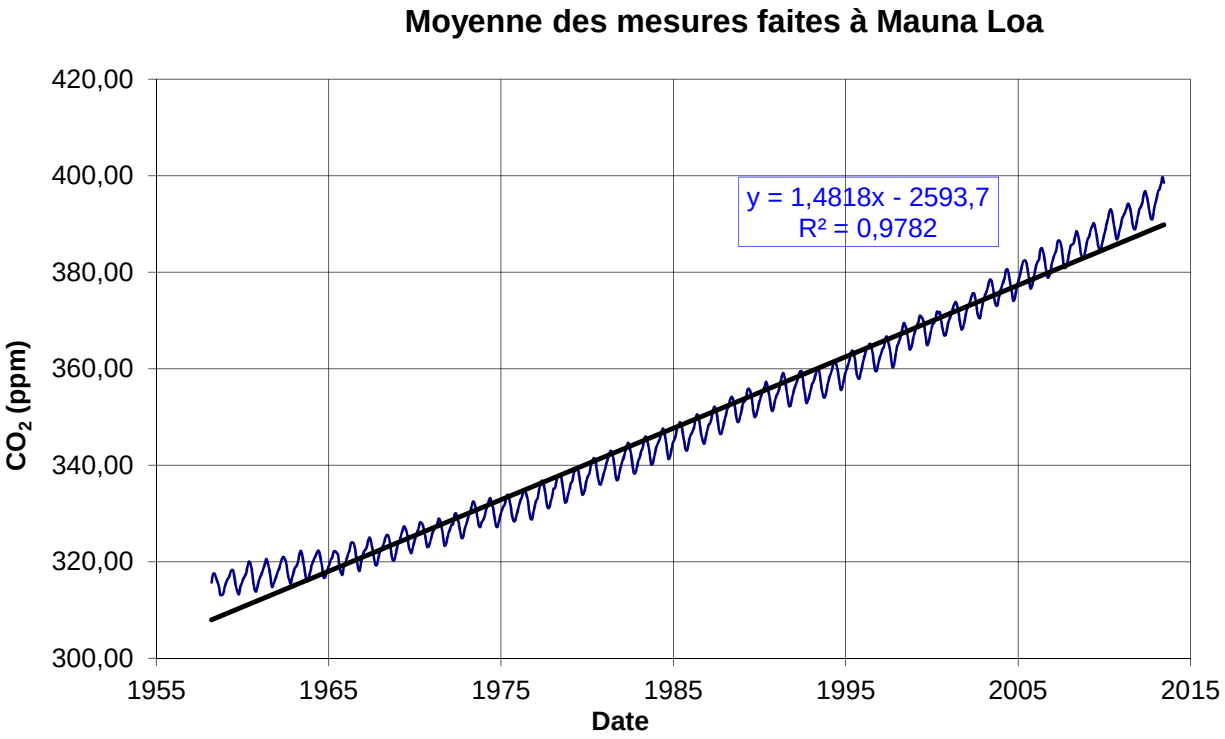


Figure 9 : *Concentrations en CO_2 moyennes à Mauna Loa.*
Image : François Saint-Jalm (CEA).

- L'équation de la droite de régression est : $C_{CO_2} = 1{,}4818\ \text{ppm/an} \times t - 2593{,}7\ \text{ppm}$. Elle n'a de sens qu'entre les années 1958 et 2013. Le coefficient de détermination est : $R^2 = 0{,}9782$. Il est moins élevé que pour les droites tracées avec les données de l'Île Amsterdam car les points de mesures sont plus éparpillés par rapport à la droite.

- On note une différence essentielle par rapport à ce qui est observé à l'Île Amsterdam : il y a une oscillation annuelle dans la concentration en CO_2 mesurée. Elle connaît un maximum local vers mars – avril et un minimum local vers septembre. On peut penser que cette oscillation est due à la végétation. Comme il y a beaucoup plus de terres émergées dans l'hémisphère Nord que dans le Sud, l'influence de la végétation est plus sensible au Nord. Il y a peu de photosynthèse pendant l'hiver ce qui fait que la concentration en CO_2 est maximale à la fin de cette saison. En revanche, la photosynthèse a fonctionné à plein régime pendant le printemps et l'été ce qui justifie le minimum observé au mois de septembre.
  Cependant, tout comme à l'Île Amsterdam, la concentration en CO_2 augmente globalement depuis 1958 et on peut remarquer qu'elle le fait de plus en plus vite.

- La vitesse moyenne à laquelle la concentration en CO_2 augmente est la dérivée de l'équation précédemment trouvée :

$$\boxed{v = 1{,}4818\ \text{ppm/an}}$$

Activité 2.4. Trois périodes – trois courbes

- De la même façon qu'avec les mesures faites à l'Île Amsterdam, il est possible de distinguer trois périodes qui montrent que l'augmentation de la concentration en CO_2 s'accélère.
- Pour les trois périodes demandées on obtient les courbes observables dans le fichier Excel « Mauna Loa (Corrigé) ».

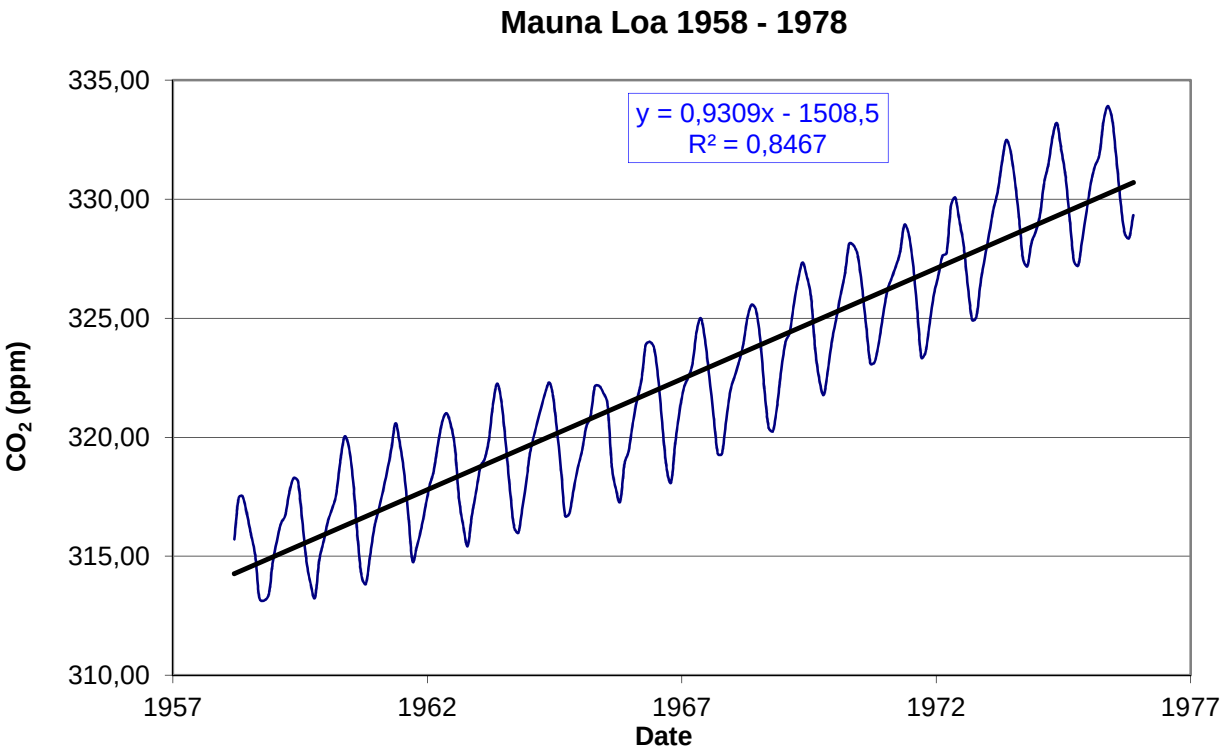


Figure 10 : *Mauna Loa de 1958 à 1978.*
Image : François Saint-Jalm (CEA).

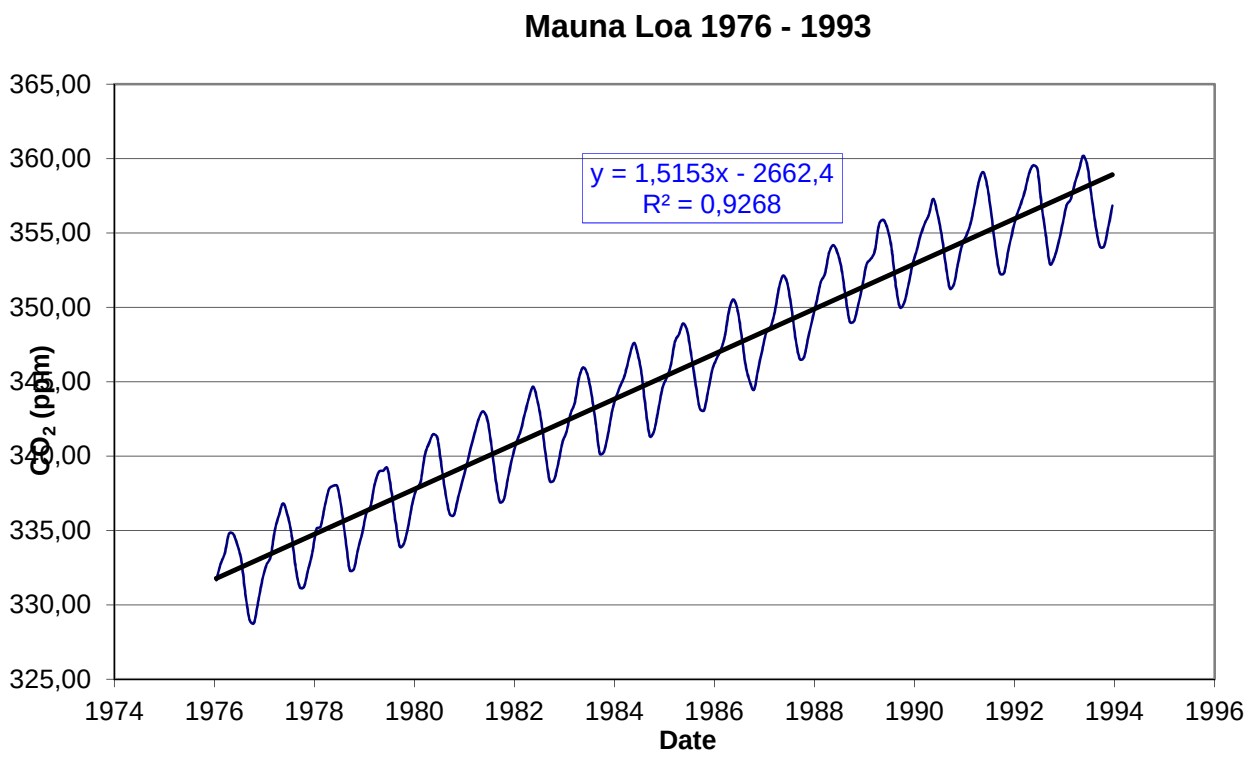


Figure 11 : *Mauna Loa de 1976 à1993.*
Image : François Saint-Jalm (CEA).

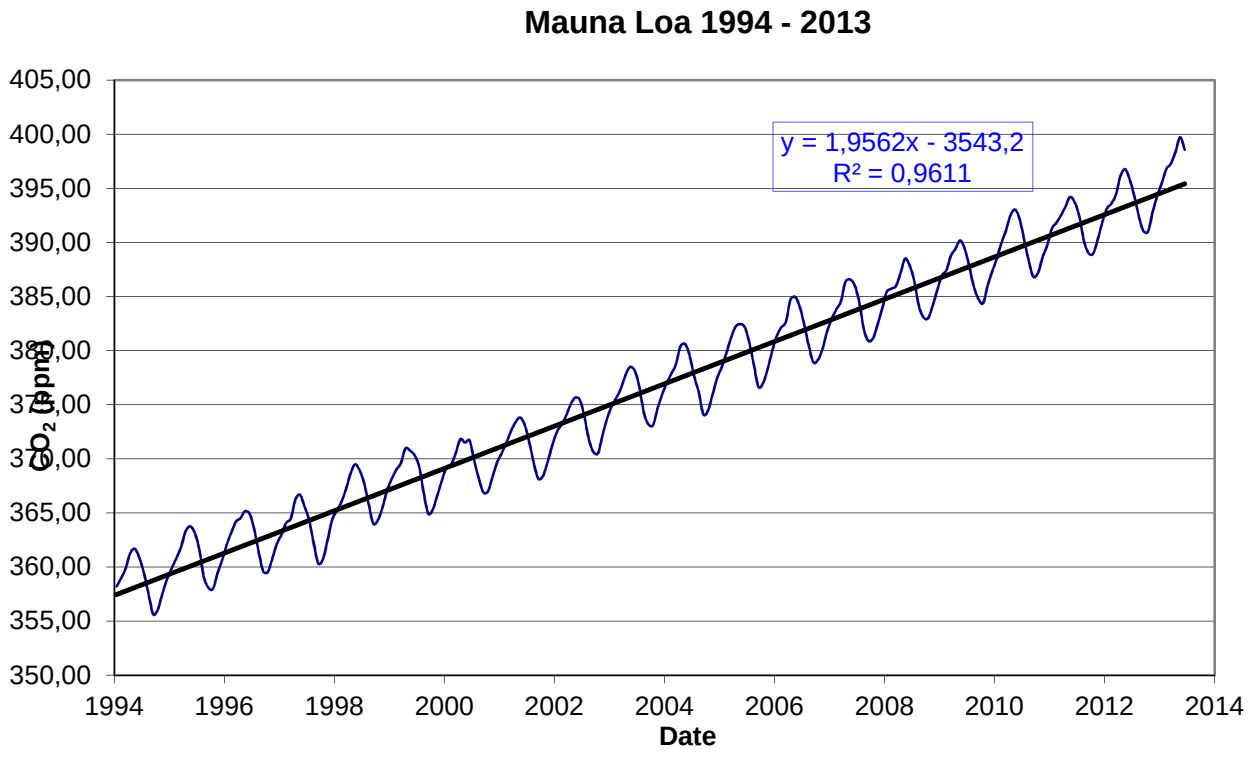


Figure 12 : *Mauna Loa de 1994 à2013.*
Image : François Saint-Jalm (CEA).

Les équations et coefficients de détermination obtenus sont :

Période	Équation de la droite	Coefficient de détermination
1958 - 1975	$C_{CO_2} = 0,9309\ \text{ppm/an} \times t - 1508,5\ \text{ppm}$	$R^2 = 0,8467$
1976 - 1993	$C_{CO_2} = 1,5153\ \text{ppm/an} \times t - 2662,4\ \text{ppm}$	$R^2 = 0,9268$
1994 - 2013	$C_{CO_2} = 1,9562\ \text{ppm/an} \times t - 3543,2\ \text{ppm}$	$R^2 = 0,9611$

Comme précédemment, on peut arrondir :

Période	Équation de la droite
1958 - 1975	$C_{CO_2} = 0,93\ \text{ppm/an} \times t - 1508\ \text{ppm}$
1976 - 1993	$C_{CO_2} = 1,52\ \text{ppm/an} \times t - 2662\ \text{ppm}$
1994 - 2013	$C_{CO_2} = 1,96\ \text{ppm/an} \times t - 3543\ \text{ppm}$

De la même façon que précédemment, on peut faire une estimation de l'accélération de l'augmentation de la concentration en CO_2 dans l'atmosphère. On obtient :

$$a = \frac{1,9562\ \text{ppm/an} - 0,9309\ \text{ppm/an}}{2003,5\ \text{ans} - 1966,5\ \text{ans}} \quad \Rightarrow \quad \underline{a = 0,02771\ \text{ppm} \cdot \text{an}^{-2}}$$

Le résultat arrondi est donc : $\boxed{a = 0,028\ \text{ppm} \cdot \text{an}^{-2}}$.

Activité 2.5. Approche polynomiale

- Se reporter au fichier Excel « Mauna Loa (Corrigé) », feuilles « Régression polynomiale », « Régr poly valeurs », « Régr poly courbe », « Régr Solveur » et « Courbe Solveur ». La courbe de régression polynomiale est la suivante :

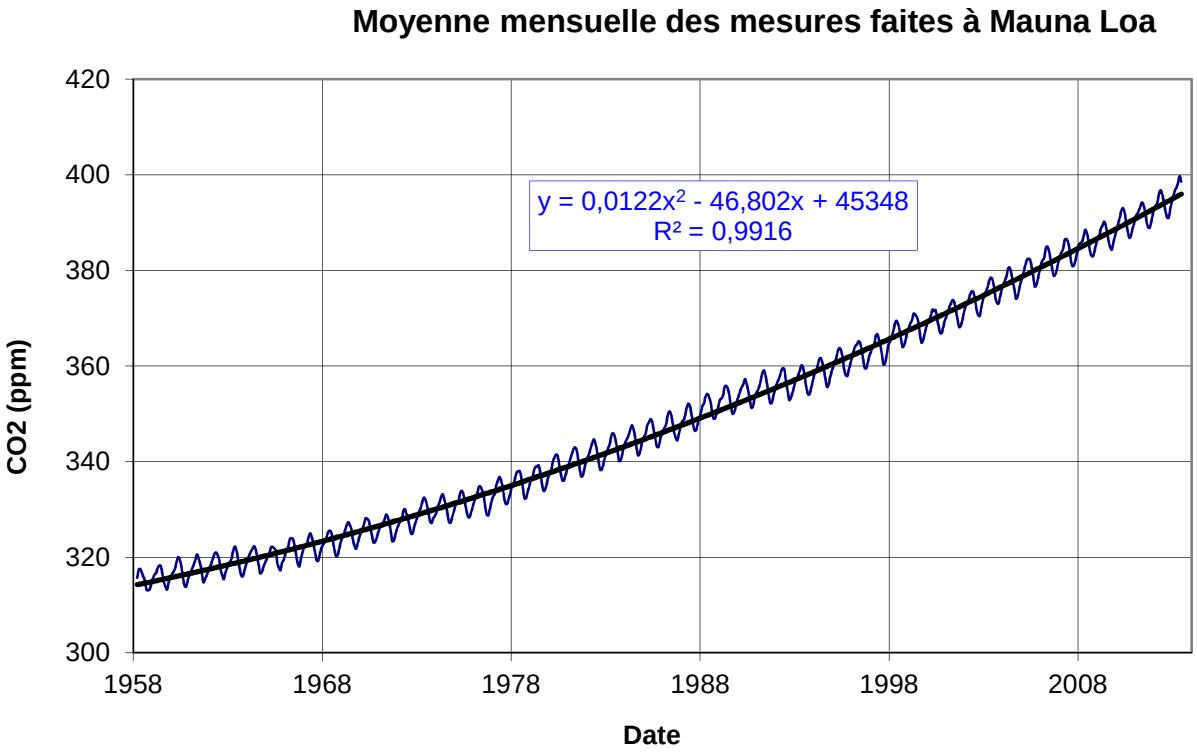


Figure 13 : *Mauna Loa, régression polynomiale.*
Image : François Saint-Jalm (CEA).

La fonction « régression polynomiale de degré 2 » donne l'équation :

$$C_{CO_2} = 0{,}0122\ \text{ppm}\cdot\text{an}^{-2}\times t^2 - 46{,}802\ \text{ppm}\cdot\text{an}^{-1}\times t + 45348\ \text{ppm}$$

Cependant, si l'on trace la courbe correspondant à cette équation, on obtient :

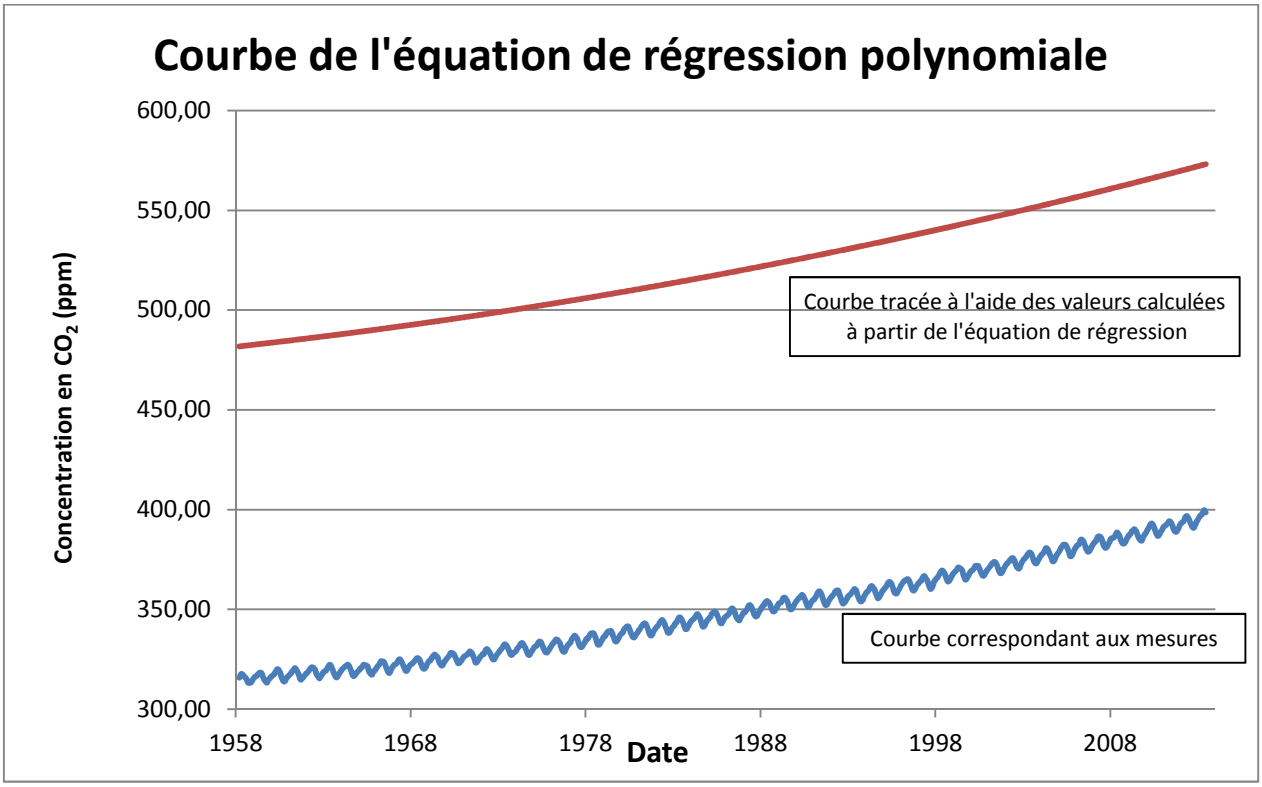


Figure 14 : *Mauna Loa. Comparaison entre les mesures et la courbe de régression tracée à partir de l'équation trouvée par Excel. Image : François Saint-Jalm (CEA)*

Il apparaît donc bien que l'équation n'est pas bonne.

En utilisant la méthode du solveur, on trouve :

$$C_{CO_2} = 0{,}01388\ \text{ppm}\cdot\text{an}^{-2} \times t^2 - 53{,}681\ \text{ppm}\cdot\text{an}^{-1} \times t + 52212{,}4\ \text{ppm}$$

La vitesse d'augmentation de la concentration en CO_2 est la dérivée par rapport au temps de l'équation que nous venons d'obtenir. C'est donc :

$$v = 0{,}02776\ \text{ppm}\cdot\text{an}^{-2} \times t - 53{,}681\ \text{ppm/an}$$

On obtient ainsi pour les quatre années demandées :

Année	**Vitesse d'augmentation de la concentration en CO_2**
1968	0,965 ppm/an
1987	1,49 ppm/an
2000	1,85 ppm/an
2010	2,13 ppm/an

Activité 2.6. Amplitude des oscillations annuelles

- Pour le tracé de la courbe de l'ensemble des mesures et de celles des maxima et des minima locaux, se reporter au fichier Excel « Mauna Loa (Corrigé) », feuille « Maxima et minima graphe ».

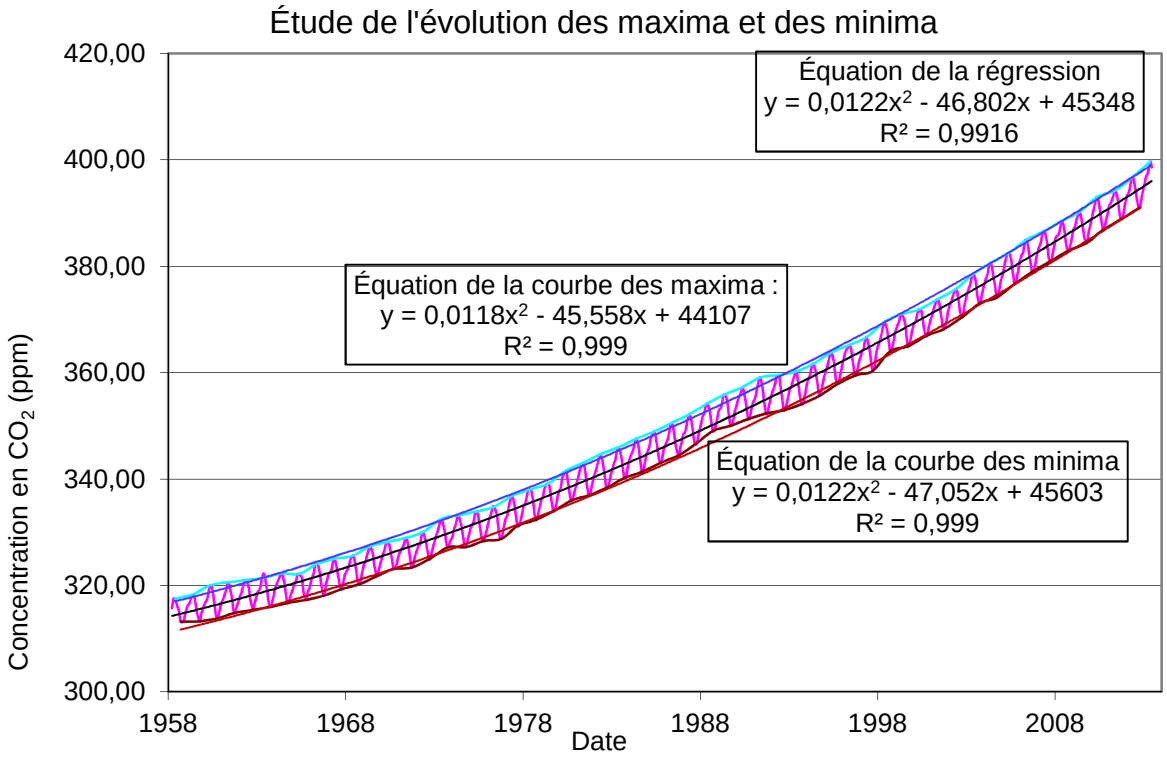


Figure 15 : *Mauna Loa. Maxima et minima.*
Image : François Saint-Jalm (CEA).

- Les courbes de régression polynomiale des deux enveloppes sont dans le fichier Excel « Mauna Loa (Corrigé) », feuille « Maxima et minima graphe ». Les équations sont fausses. Elles sont calculées dans la feuille « Recherche équations » par la méthode du solveur. On trouve :
  - Maxima :

$$C_{CO_2} = 0,011845\ \text{ppm}\cdot\text{an}^{-2}\times t^2 - 45,558\ \text{ppm}\cdot\text{an}^{-1}\times t + 44107\ \text{ppm}$$

  - Minima :

$$C_{CO_2} = 0,01122217\ \text{ppm}\cdot\text{an}^{-2}\times t^2 - 47,052\ \text{ppm}\cdot\text{an}^{-1}\times t + 45603\ \text{ppm}$$

- Les valeurs calculées des maxima et des minima à partir des équations de régression sont dans le fichier Excel « Mauna Loa (Corrigé) », feuille « Étude de l'amplitude ». Leur différence l'est aussi : c'est ce qu'on considère comme étant l'amplitude des oscillations. Comme c'est la différence de deux polynomes du second degré, c'est un polynome du second degré dont la courbe est tracée dans la même feuille. Son équation est :

$$A = -4{\cdot}10^{-4}\ \text{ppm}\cdot\text{an}^{-2} \times t^2 - 1{,}494\ \text{ppm}\cdot\text{an}^{-1} - 1496\ \text{ppm}$$

La courbe a l'allure suivante :

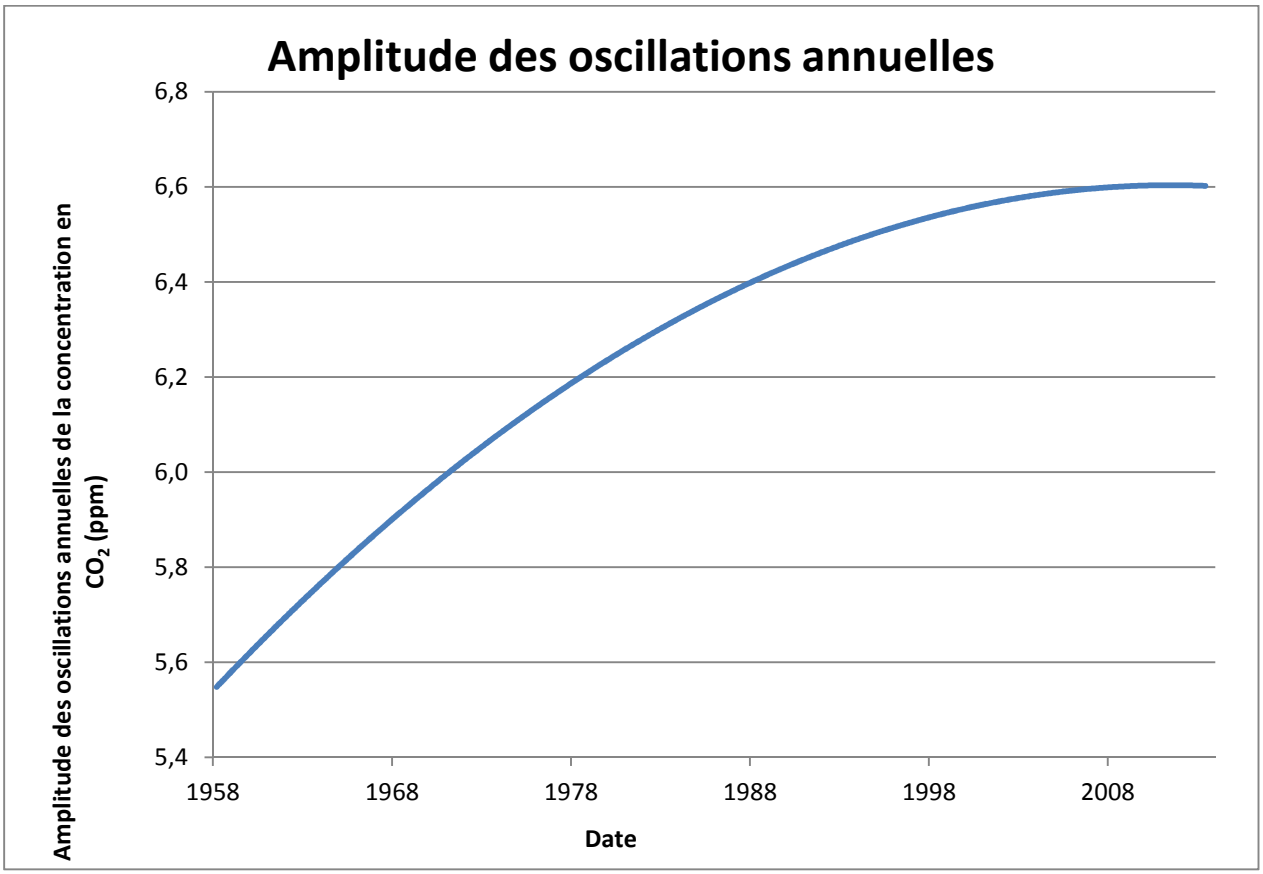


Figure 16 : *Mauna Loa. Amplitude des oscillations annuelles.*
Image : François Saint-Jalm (CEA).

- Il semble que l'amplitude des oscillations annuelles augmente avec le temps mais se stabilise.

Mace Head

Activité 3.1. Localisation

- La station de Mace Head se situe sur la côte Ouest de l'Irlande. Comme celle de Mauna Loa, elle est dans l'Hémisphère Nord. Comme celle de l'Île Amsterdam, elle est à basse altitude. Mais contrairement aux deux précédentes stations, elle n'est pas au beau milieu

de l'Océan : elle fait face à la partie Nord de l'Océan Atlantique et est en quelque sorte adossée au Continent Européen, pour ne pas dire Eurasien.



Figure 17 : *Localisation de la Station de Mace Head.*
Image : Google Maps.

On remarquera aussi que cette station se trouve en pleine zone tempérée qui est météorologiquement turbulente.

Activité 3.2. Tracé de la courbe

- Se reporter au fichier Excel « Mace Head », feuille « Concentration CO_2 ». La courbe est la suivante :

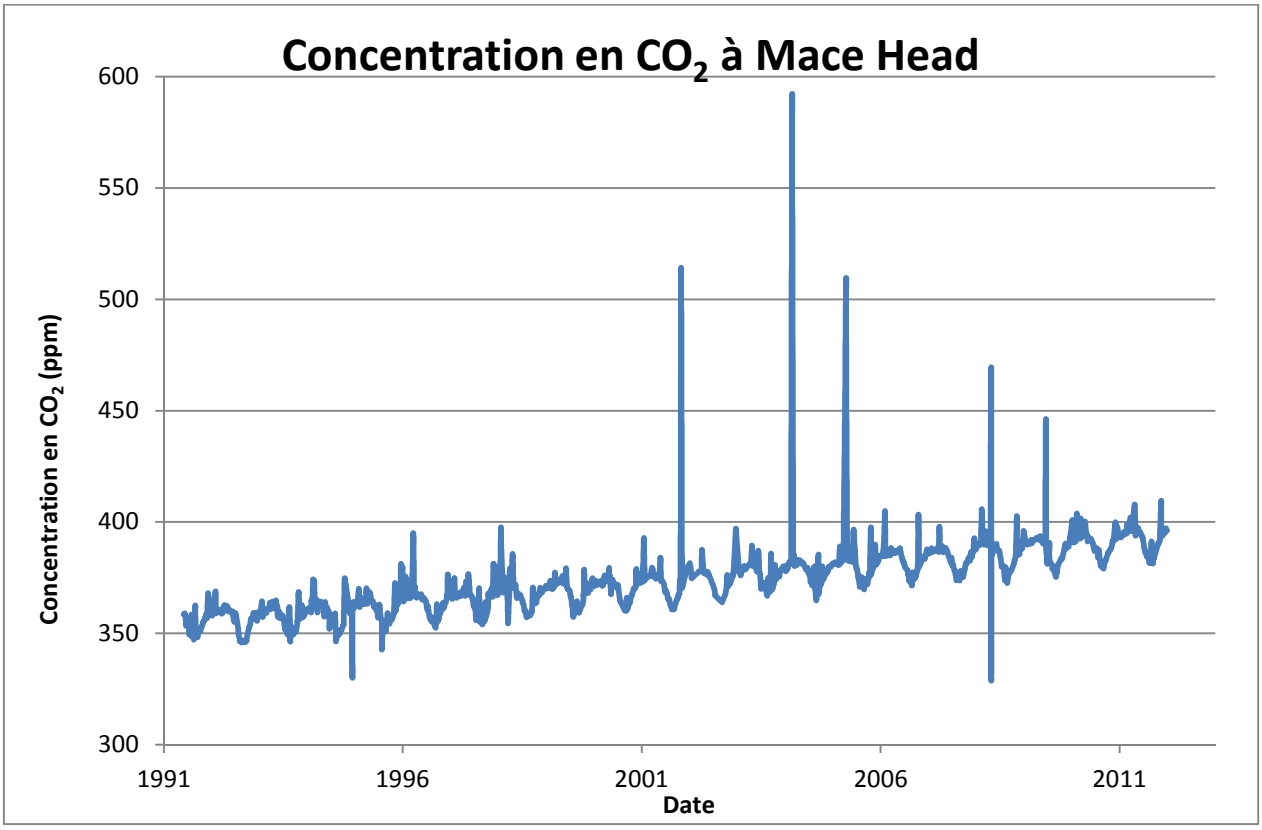


Figure 18 : *Concentration en CO_2 à Mace Head.*
Image : François Saint-Jalm (CEA).

Trois remarques :

- La première remarque que l'on peut faire est qu'une augmentation progressive de la concentration moyenne en CO_2 est observée. Les valeurs mesurées passent d'environ 350 ppm à un peu moins de 400 ppm.
- La seconde remarque porte sur la périodicité annuelle des valeurs relevées. Cela ressemble à ce qu'on observe à Mauna Loa.
- La troisième remarque revient à constater que de nombreuses mesures « sortent des rangs » et se dispersent de façon apparemment incompréhensible.

Activité 3.3. Vent d'Est, vent d'Ouest

- La courbe demandée est la suivante :

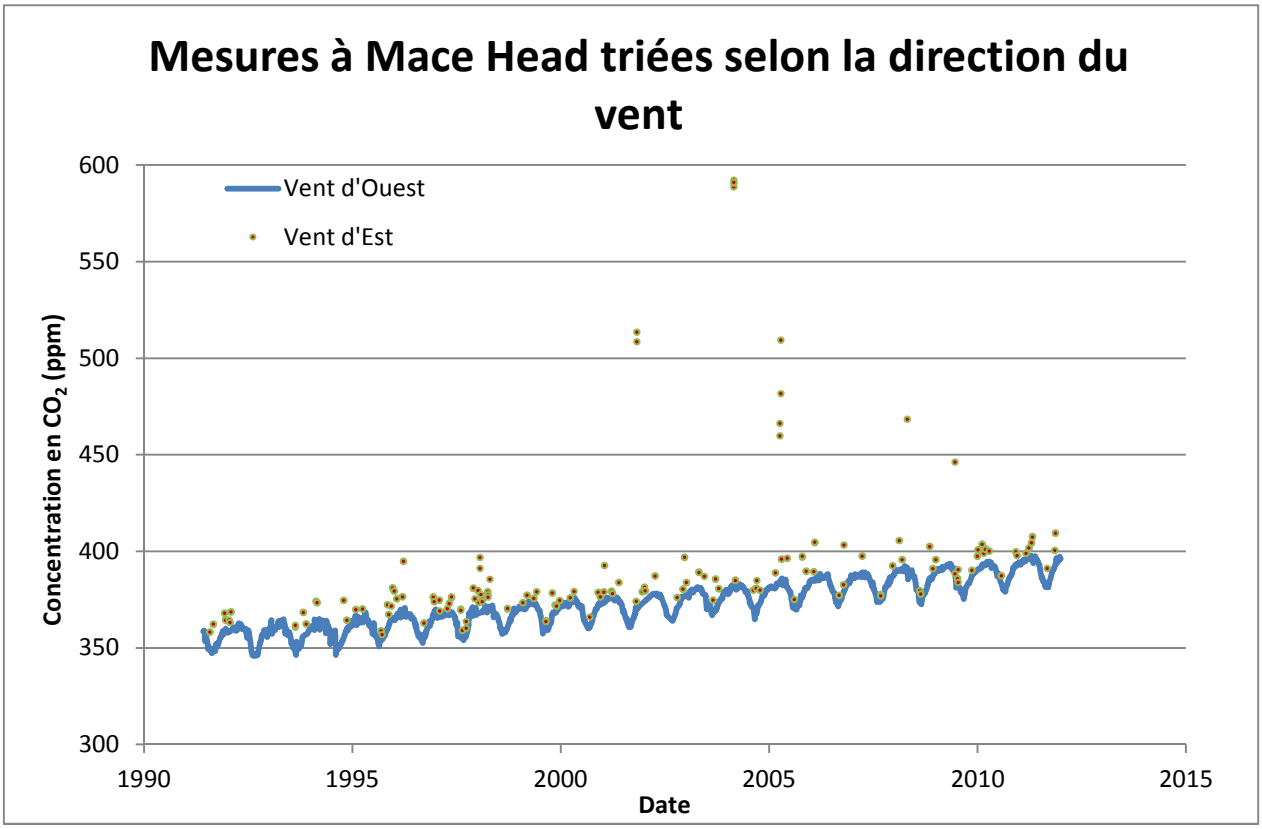


Figure 19 : *Concentration en CO_2 à Mace Head.*
Image : François saint-Jalm (CEA).

- Il apparaît que la composition de l'atmosphère est très sensible à l'activité humaine en ce qui concerne le dioxyde de carbone. Il suffit que la station de Mace Head se trouve sous le vent d'une ville ou d'une zone industrielle pour que la concentration en CO_2 s'en trouve affectée dans le sens d'une augmentation.

www.cea.fr

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Direction de la Communication | Service Editions - Evènements
91191 Gif-sur-Yvette Cedex | T. +33 (0)1 64 50 16 09

Établissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019