



## Les Cahiers de la Fondation Pierre VÉROTS

**POUR L'ETUDE ET LA PRESERVATION DE LA FAUNE ET DE LA FLORE DE LA DOMBES**

Reconnue d'utilité publique par décret du 13 juin 1984

### **QUE DEVIENT, AVEC LE TEMPS, LE GAZ CARBONIQUE QUE NOUS DÉVERSONS DANS L'ATMOSPHÈRE EN BRÛLANT LES COMBUSTIBLES FOSSILES ?**

#### **RÉSUMÉ**

*N*ous déversons actuellement dans notre atmosphère, chaque année, des milliards de tonnes de gaz carbonique.

Que devient ce gaz ? S'accumule-t-il dans l'air, ou diffuse-t-il peu à peu ailleurs, dans l'eau des océans par exemple ? Mais alors à quelle vitesse cela se passe-t-il ? Peut-on en avoir une idée ?

Pour tenter d'apporter une réponse à ces questions, je suis parti de deux courbes publiées sur le web et qui donnent :

- d'une part, la mesure de la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère, effectuée depuis près d'un siècle par les américains à Hawaï, complétée pour un passé plus lointain par la même mesure effectuée dans les bulles d'air piégées dans les glaces arctiques.
- et d'autre part, la comptabilité des tonnages de combustibles fossiles brûlés depuis près de deux siècles sur notre planète.

A priori ce sont deux séries de données de natures différentes qui, certes, ont toutes deux évolué dans le temps de manière croissante, mais dont l'analyse comparative n'a semble-t-il jamais été tentée. C'est l'objet de notre étude.

#### **Quelles en sont les conclusions ?**

On constate d'abord qu'on ne retrouve aujourd'hui dans l'air qu'environ 60% du gaz carbonique que l'humanité a déversé dans l'atmosphère depuis 1850 par ses chaudières ou moteurs divers. Les 40% manquant sont donc passés ailleurs, et selon toute vraisemblance dans les océans, qui couvrent, rappelons-le, environ 70% de la surface de la planète.

Cela m'a conduit à faire l'hypothèse que l'atmosphère et les océans devaient fonctionner comme une gigantesque bouteille d'eau gazeuse. Les ingrédients sont en effet les mêmes que ceux de n'importe quelle bouteille d'eau gazeuse : de l'eau, de l'air et du gaz carbonique. Et on sait que, suivant le traitement subi par une telle bouteille, le gaz carbonique se dissout un peu plus dans l'eau ou au contraire s'en échappe.

L'humanité viendrait donc, lors de ces deux derniers siècles, de perturber, au sein de cette bouteille d'eau gazeuse planétaire, l'équilibre établi entre atmosphère et océans depuis les temps géologiques les plus reculés.

Deux chiffres permettent de caractériser notre bouteille d'eau gazeuse planétaire : les océans pèsent 2 à 300 fois plus que l'atmosphère terrestre. La bouteille est donc presque pleine d'eau. Quant au gaz carbonique contenu dans l'air qui surplombe cette eau, nous en avons augmenté aujourd'hui la teneur d'environ 30% par rapport à la teneur naturelle des siècles passés.

Compte tenu des tonnages d'eau et de gaz carbonique en cause, les océans devraient, à l'équilibre, absorber une grande partie de cet excédent. Mais dans quel délai ? Quand retrouverons-nous un équilibre stable, et une atmosphère proche de l'atmosphère d'antan ?

J'ai ainsi été amené à tester diverses hypothèses, selon lesquelles, chaque année, un pourcentage plus ou moins important du gaz carbonique en excès par rapport à la teneur d'équilibre des siècles passés serait absorbé par les océans. Si l'une d'elle permet d'expliquer l'évolution constatée au cours des dernières décennies, alors les choses devraient se passer de la même manière dans l'avenir.

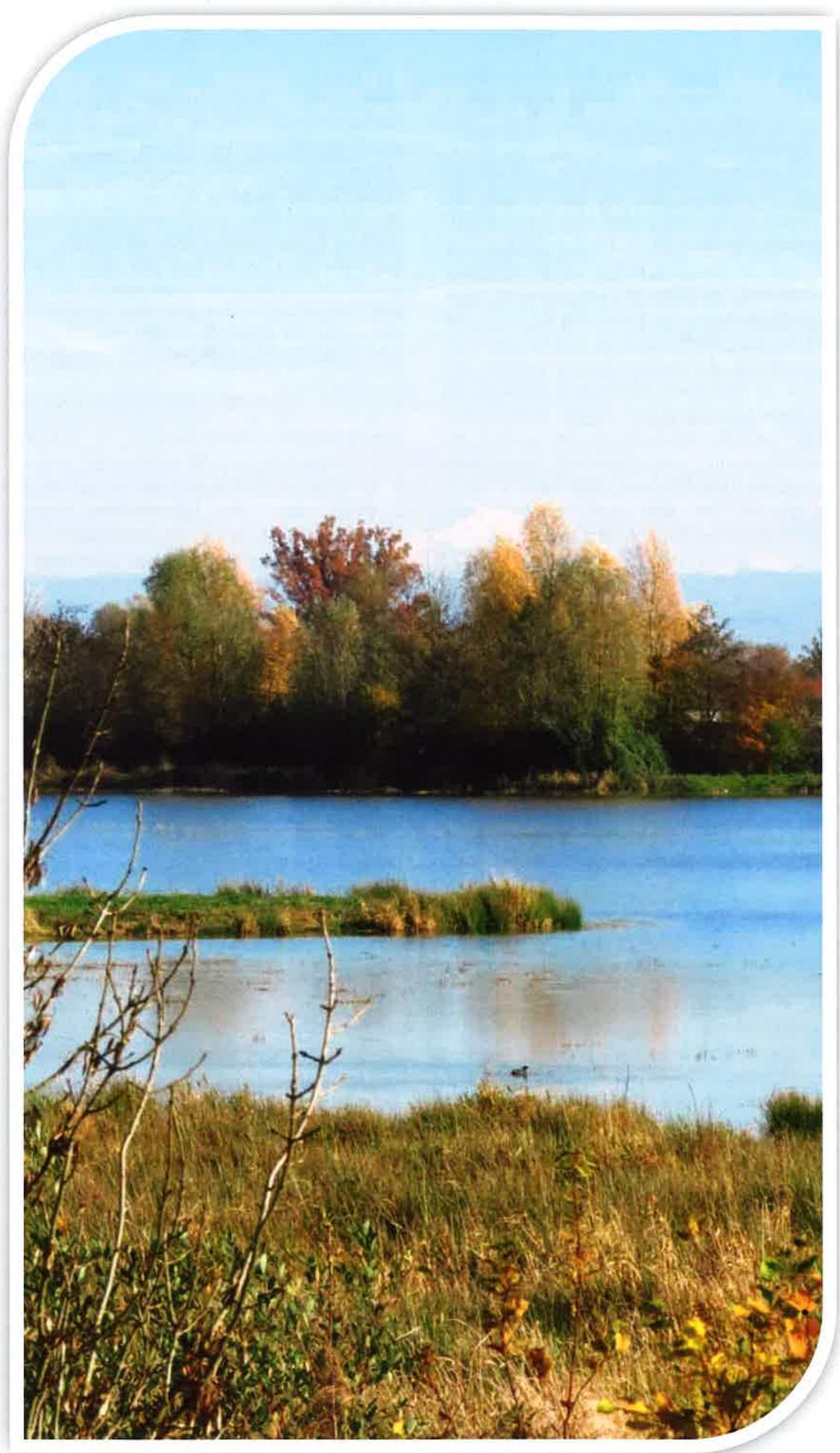
Si on teste l'hypothèse que 2% du gaz carbonique en excès par rapport à la teneur d'équilibre file dans les océans au cours d'une année déterminée on reconstitue effectivement ce que l'on a constaté tout au long du dernier siècle, et on explique alors le fait qu'on retrouve aujourd'hui dans l'atmosphère environ 60% de ce qui a été émis.

Pour l'avenir cela veut donc dire que toute tonne de carbone d'origine fossile qu'on va brûler aujourd'hui mettra un temps comparable pour être absorbée par les océans : dans 50 ans il en restera encore un bon tiers dans notre atmosphère. Et dans un siècle cette tonne ne sera passée dans les océans qu'à 90% au mieux.

Reste à savoir ce qui va se passer dans les océans. Le « changement climatique » risque en effet d'être également durable pour les habitants des eaux, avant que le carbone retrouve une place stable et inoffensive dans la croûte terrestre.

Tout cela concerne, bien évidemment, les étangs de la Dombes, qui se nourrissent de l'eau du ciel. Il conviendra donc de suivre l'évolution à long terme de l'acidité de l'eau, correction faite des variations locales ou temporaires. La Fondation ne manquera pas de s'y impliquer...

Jean ANDRIOT  
Ingénieur du Corps des Mines  
Administrateur de la Fondation Pierre VÉROTS



## INTRODUCTION

La part croissante des gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre conduit à un changement climatique. Cependant les systèmes physico-chimiques en cause sont très complexes et les prévisions sont difficiles.

Il existe bien entendu des chroniques de mesures indiscutables concernant certains paramètres. On les trouve dans les abondantes publications qui circulent. Mais en a-t-on extrait tous les enseignements qu'on pourrait en tirer ?

C'est la question que je me suis posée en contemplant deux courbes largement publiées, et qui donnent deux historiques : d'une part, la mesure incontestable de la teneur de l'atmosphère en gaz carbonique, et d'autre part la comptabilité des tonnages de carbone fossile extraits par les hommes et qui se retrouvent finalement dans le dit atmosphère après avoir libéré leur énergie par combustion. Il ne me semble pas en effet qu'on ait essayé de confronter quantitativement ces mesures qui sont apparemment de nature complètement différente. Si on y arrive, on devrait pouvoir en tirer des enseignements nouveaux, non moins incontestables, et donc d'autant plus intéressants.

On possède l'historique de ces deux grandeurs sur près de deux siècles.

On trouvera ci-après les pages du Web où chacune des deux courbes est présentée, sans plus.

Or, je pense que le tonnage de carbone présent dans l'atmosphère doit pouvoir se déduire de la teneur en gaz carbonique, qui est l'objet de mesures en volume.

Pour cela il faut connaître d'une part le poids de l'atmosphère terrestre et d'autre part la correspondance entre teneur en volume et teneur en poids du gaz carbonique.

Ce sont les calculs que je présente ci-après.

On pourra alors confronter quantitativement les deux mesures indépendantes dont on dispose.

*Cela étant fait, c'est non seulement l'examen de la situation actuelle qui sera intéressant, mais surtout celui de l'historique qui peut être fait depuis plus d'un siècle en refaisant autant de fois qu'il le faut les calculs en cause.*

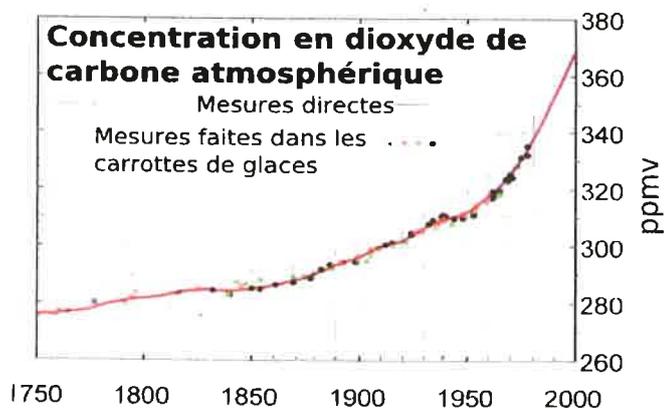
Et on verra les conclusions que j'en ai tirées.

D'où le plan de ce document :

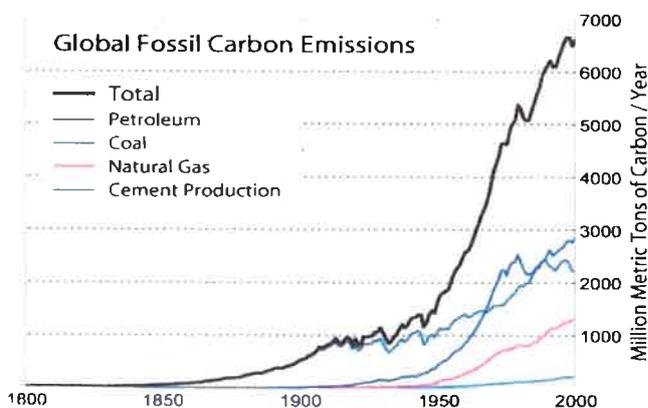
1. Quel fut en 2000 le tonnage de carbone accumulé depuis deux siècles dans l'atmosphère, calculé à partir des mesures de la teneur en volume du  $\text{CO}_2$  dans l'air ?
2. Que donne, en 2000, la comparaison du résultat précédent avec l'émission totale de gaz carbonique d'origine fossile due à la révolution industrielle ?
3. En faisant l'historique de cette comparaison, décennie après décennie depuis 150 ans, quel constat fait-on ?
4. A la lumière de ce qui précède, peut-on prédire ce que va devenir le gaz carbonique en excès dans l'atmosphère ?
5. Conclusions

### Annexes

1. Données numériques correspondant aux graphiques étudiés
2. Conversion en t. de carbone de la teneur en  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère
3. La loi de William Henry



[http://upload.wikimedia.org/flux\\_carbon](http://upload.wikimedia.org/flux_carbon)



[http://upload.wikimedia.org/global\\_carbon\\_emission](http://upload.wikimedia.org/global_carbon_emission)

## QUELLE FUT EN 2000 LA QUANTITÉ DE CARBONE ACCUMULÉE DEPUIS 2 SIÈCLES DANS L'ATMOSPHÈRE ?

On mesure régulièrement, en volume, la teneur en  $\text{CO}^2$  de l'air.

Mais ce qui nous intéresse ici, c'est de savoir comment en déduire l'augmentation du tonnage de carbone contenu dans l'atmosphère.

Pour cela, il faut appliquer cette teneur, après l'avoir exprimée en poids, au poids total de l'atmosphère terrestre.

Quel est ce poids ?

Il est égal au poids de l'air par  $\text{m}^2$ , multiplié par la surface de la terre exprimée en  $\text{m}^2$ . Commençons par calculer cette surface.

Le rayon R de la terre est égal à 6.350 km,

soit :  $6,35 \cdot 10^6$  mètre

La surface de la terre, égale à  $4\pi R^2$ , est donc de  $4 \times 3,14 \times 6,35^2 \times 10^{12} \text{ m}^2$  soit :  $5 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$

Comme le poids de l'air en tout point de la terre est égal en moyenne au poids de 760mm de mercure, c'est à dire d'une colonne d'eau d'environ 10 m, le **poids total de l'air de la planète** est égal au poids de  $5 \cdot 10^{14} \times 10 \text{ m}^3$  d'eau, soit :  $5 \cdot 10^{15}$  tonnes

La composition de l'air, en 2000, était par ailleurs la suivante, exprimée en volume :

$\text{N}^2$  : 78%

$\text{O}^2$  : 21%

$\text{CO}^2$  : 0,0369 % (ou 369 parties par million en volume, c'est à dire « ppmv »)

Mais ce qui nous intéresse est l'augmentation de la teneur en carbone depuis qu'on extrait en masse des combustibles fossiles. Or on connaît la teneur en carbone de l'atmosphère dans les siècles passés, teneur mesurée

dans les glaces anciennes, et qui était stable, autour de 0,0280 %, plus précisément 0,0285 % en 1850 (ou 285 ppmv) L'accroissement de la teneur en  $\text{CO}^2$  attribuable en 2000 aux combustibles fossiles est donc, en volume, de  $0,0369 \% - 0,0285 \% = 0,0084 \%$ , (ou 84 ppmv) :

Toutefois ce chiffre correspond à une composition de l'air exprimée en volume, c'est à dire en mole.

Comme le poids de la mole de  $\text{O}^2$  est de 32 et celui de la mole de  $\text{N}^2$  de 28, le poids d'une mole d'air est de 28,5. (l'air contenant 78% de  $\text{N}^2$  et 21% de  $\text{O}^2$ )

Le poids de la mole de  $\text{CO}^2$  est par ailleurs de 44.

Il est alors facile de calculer que l'accroissement de la quantité de  $\text{CO}^2$ , exprimé en poids est de :

$$0,0084 \times \frac{44}{28,5} = 0,0130 \% \text{ du poids de l'air}$$

L'accroissement du tonnage de  $\text{CO}_2$  atmosphérique est alors de :

$$0,000130 \times 5 \cdot 10^{15} = 65 \cdot 10^{10} \text{ tonnes}$$

Mais le carbone ne représente, dans le  $\text{CO}^2$ , que 27% du poids. Donc **l'augmentation du tonnage de carbone dans l'atmosphère était en 2000** d'environ :

$$0,27 \times 65 \times 10^{10} = 18 \cdot 10^{10} \text{ tonnes.}$$

**18. 10<sup>10</sup> tonnes** (ou 180 G t.)

D'une manière plus générale, nous retiendrons que la relation entre la teneur en volume du  $\text{CO}^2$  contenu dans l'air, exprimée en ppmv, et le poids du carbone présent dans l'atmosphère est la suivante : (voir l'annexe n°2)

Poids du Carbone dans l'atmosphère (en t.) :

$$2,1 \times (\text{nombre de ppmv}) \times 10^9$$

Cette relation sera utilisée dans certains calculs qui vont suivre.

## EN 2000, QUELLE A ÉTÉ LA CONSOMMATION DE CARBONE FOSSILE CUMULÉE DEPUIS LE DÉBUT DE LA RÉVOLUTION INDUSTRIELLE ?

La consommation de carbone fossile depuis 1850 est donnée par la courbe publiée sur le Web, ou encore par un listing détaillé d'origine américaine, qu'on trouve également sur le Web.

En cumulant, année après année, les tonnages donnés par cette courbe ou par le listing, ce qui donne le même résultat, on calcule l'émission de carbone depuis 1850, c'est à dire grosso modo depuis le début de l'ère industrielle.

On trouve environ :

**28. 10<sup>10</sup> tonnes** (ou 280 milliard de t, soit 280 Gt)

Ce qui est nettement supérieur au tonnage supplémentaire de carbone présent dans l'atmosphère. On a vu en effet dans le chapitre précédent, que l'accroissement du C dans l'atmosphère n'a été que de  $18 \cdot 10^{10}$  tonnes.

**Donc tout le carbone brûlé depuis un siècle ne se retrouve qu'en partie dans l'atmosphère.**

### Déforestation

Les chiffres ci-dessus ne tiennent pas compte de la déforestation.

On sait en effet que l'homme est la cause de rejets de carbone non seulement par la combustion de carbone fossile mais aussi par la déforestation qu'il a entreprise industriellement depuis plusieurs décennies.

La déforestation devrait donc participer à l'augmentation du taux de  $\text{CO}^2$  dans l'atmosphère, et le carbone de sa combustion s'ajouter au chiffre précédent.

Malheureusement, contrairement au cas des combustibles fossiles, on ne dispose pas d'une comptabilité exacte de ce carbone.

Cela remet-il en cause notre tentative d'établir un bilan objectif du carbone d'origine humaine ?

On trouve dans la littérature que la **biomasse forestière** de la planète représenterait actuellement :

**28. 10<sup>10</sup> t. de carbone**

Autrement dit l'équivalent du carbone d'origine fossile brûlé à ce jour.

Mais ce n'est pas ce chiffre qui nous intéresse, c'est sa diminution du fait de la déforestation industrielle qui a sévi dans la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle.

La déforestation annuelle à proprement dite concernerait selon les mêmes sources le 1/300 de ce chiffre, soit environ :

**0,1. 10<sup>10</sup> t/ an de C (ou 1 Gt / an)**

ce qui, sur les 30 dernières années du 20<sup>e</sup> siècle par exemple, correspondrait à 30 Gt, soit de l'ordre de 1/10<sup>e</sup> de l'accroissement du carbone atmosphérique.

*Ce nombre est cependant probablement à corriger du fait que dans beaucoup de régions les forêts sont certes rasées, mais repoussent en vue d'une autre récolte. Et le bois récolté n'est pas forcément entièrement brûlé. Son carbone peut se retrouver par exemple stocké sous forme de bois d'œuvre.*

D'autre part, au cours du XX<sup>e</sup> siècle d'importantes régions arides ont été irriguées, créant de nouvelles masses végétales, contrecarrant partiellement les effets de la déforestation.

Quoiqu'il en soit nous retiendrons cependant le chiffre cité dans la littérature. en l'appliquant aux dernières décennies du 20<sup>e</sup> siècle, soit 30 à 50 Gt.

En tout état de cause il s'agit d'un ordre de grandeur inférieur à celui correspondant à la combustion des combustibles fossiles.

#### Comparaison avec le carbone atmosphérique

En 2000, le total du carbone fossile brûlé et du carbone forestier supposé également brûlé serait donc de l'ordre de 280 + 50 = 330 Gt.

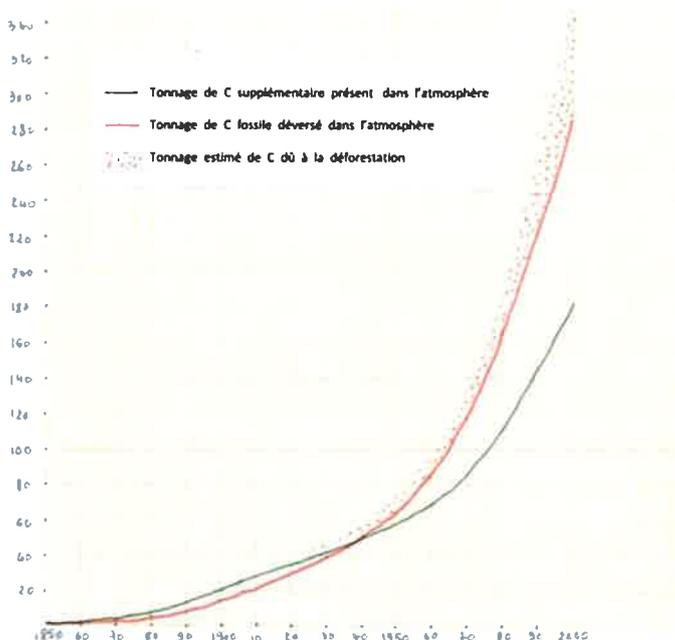
En comparaison on ne retrouve qu'environ 180 Gt de carbone dans l'atmosphère.

Où sont passés les 150 Gt manquant ?

## ÉVOLUTION COMPARÉE DANS LE TEMPS DES TONNES DE CARBONE FOSSILE EXTRAITES AVEC LES TONNES DE CARBONE CONTENUES DANS L'ATMOSPHÈRE

On vient de voir que l'atmosphère terrestre recèle actuellement un supplément de seulement 180 Gt de carbone alors que les hommes y ont déversé l'équivalent de 280 Gt, et même peut-être de l'ordre de 330 Gt si on tient compte de la déforestation. La différence se retrouve nécessairement ailleurs.

Pour y voir plus clair nous n'allons pas nous contenter de faire le point sur la seule année 2000, mais nous allons reconstituer l'historique depuis 1850, puisque nous avons la chance d'avoir, année après année, les deux séries de chiffres donnant la teneur en C de l'atmosphère d'une part, les tonnages de carbone fossile qui ont été rejetés chaque année d'autre part. La figure ci-après donne les deux courbes représentant cet historique.



**La courbe rouge donne la quantité totale de carbone fossile déstocké à une certaine date** (courbe déduite de la courbe du Web qui donne, elle, les quantités annuelles). Il faudrait y ajouter le carbone déstocké à la suite de la déforestation. Là malheureusement on quitte la mesure objective pour une évaluation approximative. Mais si on se réfère aux évaluations des spécialistes dont j'ai déjà parlé, les chiffres seraient d'un ordre de grandeur nettement inférieur à celui du carbone fossile déstocké. Elles les conforteraient au contraire, comme on le verra. **La courbe verte donne le carbone stocké dans l'atmosphère au-delà du stock « naturel » des siècles précédents** (sur la base d'environ 280 ppmv de CO<sup>2</sup> ce stock naturel était, à titre indicatif, de près de 600 Gt et résultait de l'équilibre qui s'était établi entre air-eau-terre au cours des âges géologiques).

1. On voit que l'écart entre les deux courbes s'est creusé avec le temps. Donc le **CO<sup>2</sup> quitte l'atmosphère dans des quantités d'autant plus importantes que le temps passe.**

2. Où passent ces quantités de CO<sup>2</sup> ?

**Leur destination ne peut être que la masse énorme des océans**, où, selon certains auteurs, environ 35.000 Gt de C se trouveraient déjà sous forme dissoute.

La reprise par la lithosphère qui, certes, contient peut-être près de mille fois plus de C que les océans mais sous forme combinée dans les roches, est probablement beaucoup plus lente à notre échelle de temps humaine... Quant à la végétation, même si elle est stimulée par un accroissement du CO<sup>2</sup> dans l'air, sa part ne peut suivre une pareille explosion dans le temps et reste marginale.

3. Remarquons au passage que la masse des océans est égale à 2 à 300 fois celle de l'atmosphère. En effet l'atmosphère pèse l'équivalent d'environ 10 m. d'eau. Les océans ont une épaisseur moyenne de 3 à 4.000 m. d'eau, mais sur seulement 70% de la planète, soit l'équivalent de 2 à 3000 m. d'eau uniformément répartie. **Les océans pèsent donc 2 à 300 fois le poids de l'atmosphère.** Rien d'étonnant donc à ce qu'ils puissent contenir quelques 35.000 Gt de C, à comparer aux 600 Gt contenus naturellement par l'atmosphère, avant l'ère industrielle.

Il s'en suit que si la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère venait à doubler et que la surcharge en cause passait dans les océans, cela équivaldrait à une augmentation de la teneur en C des océans de 1,5 à 2%.

4. L'équilibre entre un gaz et un liquide où ce gaz est soluble a été décrit par William Henry en 1803 (voir l'annexe 3 sur la Loi de Henry).

Cette loi ne nous renseigne pas sur la vitesse avec laquelle cet équilibre est atteint. En revanche, comme la masse de carbone des océans est très supérieure à celle de l'atmosphère cette loi permet de prédire que **le nouvel équilibre sera très proche de l'équilibre initial des siècles passés**, puisque le rapport des quantités de CO<sub>2</sub> dans les deux milieux est un invariant et que l'ensemble des masses de C du système serait peu affecté, eu égard à la masse écrasante du C des océans par rapport aux variations de la masse de C de l'atmosphère.

5. Si cette perspective est quelque peu rassurante à long terme, la question qui concerne l'humanité est de savoir si cette échéance est proche, lointaine ou hors échelle de temps humaine.

Regardons pour cela le tableau ci-dessous :

Année	Carbone accumulé dans l'atmosphère		Carbone brûlé	
	en ppmv de CO <sub>2</sub> depuis 1850	en Gt	en Gt depuis 1850	part encore présente dans l'atmosphère
1850	0	0	0	
60	1	2	0,5	
70	3	6	2,1	
80	5	11	4,5	
90	9	19	8	
1900	12	25	13	
10	15	32	20	
20	17	36	29	
30	21	44	39	
40	24	50	50	100%
1950	27	57	63	90%
60	33	69	84	82%
70	39	82	127	70%
80	53	111	165	67%
90	68	143	222	64%
2000	84	176	285	62%

On constate qu'à partir de 1930 le C accumulé dans l'atmosphère est en quantité inférieure à la quantité de carbone fossile brûlé.

On constate de plus que la proportion va en diminuant, pour tourner actuellement autour de 60%.

6. Mais que penser en revanche de la période antérieure à 1930 où on constate au contraire que la quantité de carbone accumulée dans l'atmosphère est supérieure à celle comptabilisée au titre des combustibles fossiles ? D'où peut venir ce carbone ?

On sait, depuis W. Henry, que l'équilibre entre les deux milieux, liquide et gazeux, est fonction de la température de ces milieux. Autrement dit, en cas de perturbation de ces températures, des transferts de gaz peuvent avoir lieu entre ces milieux.

Or, à la fin du 19<sup>e</sup> siècle, il y eut un épisode froid. Comme l'inertie thermique des océans est sans commune mesure avec celle de l'atmosphère, **du CO<sub>2</sub> a dû logiquement passer des océans vers l'atmosphère, plus froid.**

Au demeurant il s'agit de chiffres faibles, comparés à ceux de la période suivante. Nous ne nous y attarderons donc pas plus.

7. Revenons à la période contemporaine où les quantités de carbone en cause sont beaucoup plus importantes, et où on constate une absorption massive par les océans.

Ce sont les déséquilibres dus aux rejets massifs de C qui deviennent déterminants et non plus des différentiels de température entre atmosphère et océans.

**Presque tout le CO<sub>2</sub> déversé dans l'atmosphère se retrouvera donc un jour dans les océans, engendrant une augmentation de l'acidité de l'eau**, que l'on semble d'ailleurs déjà détecter par certaines mesures du Ph au cours de ces dernières années.

Mais c'est une autre histoire ! Qui n'est d'ailleurs pas plus rassurante pour la flore et la faune océaniques que ne l'est le réchauffement climatique pour les habitants terrestres.

8. Cela nous amène à nous poser la question de savoir s'il est possible de déduire des observations faites au cours du dernier siècle un modèle permettant de prévoir l'évolution des échanges de gaz carbonique entre l'atmosphère et les océans.

C'est l'objet du chapitre qui suit.

## SUR LA VITESSE DE TRANSFERT DU CO2 ATMOSPHÉRIQUE VERS LES OCÉANS

Nous avons au départ 2 courbes, dont l'une, représentant la teneur en CO<sup>2</sup> de l'atmosphère, est fonction de l'autre, représentant les tonnages de C brûlés par les hommes. Mais selon un mécanisme inconnu.

Certes nous avons vu que le CO2 atmosphérique file peu à peu dans les océans et que l'atmosphère devrait revenir à une teneur de ce gaz voisine de celle qui existait jadis.

Mais dans quel délai ?

Le modèle le plus simple qui vient à l'esprit consiste à supposer que la vitesse de transfert du gaz carbonique vers l'eau est proportionnelle à la pression partielle supplémentaire de ce gaz dans l'atmosphère. Dans l'intervalle de variation, quelques centaines de ppmv seulement, c'est en tout cas une hypothèse acceptable.

Dit autrement cela consiste à supposer qu'au bout d'un certain temps « dt » une proportion P du gaz en excès est passée dans l'eau, P étant une constante.

Si notre schéma est proche de la réalité alors on devrait, en reprenant les deux courbes indépendantes représentant l'une le CO2 brûlé et l'autre la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère, constater qu'en appliquant notre modèle une des courbes se déduit de l'autre et réciproquement. Et si tel est le cas, alors l'hypothèse à la base du calcul, à savoir la vitesse avec laquelle les équilibres s'établissent, se trouvera confortée.

Recherchant un ordre de grandeur, et non une valeur précise, j'ai travaillé à partir du tableau qui donne des valeurs de 10 ans en 10 ans (et non d'années en années qu'une approche plus fine permettrait), sur un siècle, de 1900 à 2000.

Il fallait faire une hypothèse de départ, répondant à la question suivante :

« Au bout de 10 ans, sans nouvel apport au cours de la décennie, quelle est la proportion du CO2 en excès qui sera passée dans les océans ? »

Après quelques essais c'est le chiffre arrondi de 20% par décennie qui s'est avéré le meilleur pour faire coïncider les deux courbes. Car par ce calcul on constate, et c'est le point le plus important, que non seulement on retrouve un résultat acceptable en 2000, mais que les historiques des chiffres se superposent tout au long du 20<sup>e</sup> siècle, nonobstant les changements de pente parfois brusques.

Le calcul pratique fut le suivant :

Considérons l'année n, puis l'année n+10

Soient : T<sub>n</sub> le tonnage de CO2 présent l'année n

D<sub>n</sub> le tonnage déversé au cours de la décennie n/n+10

alors  $T_{n+10} = T_n \times (1 - 0,20) + D_n$

On trouvera ci-après le tableau résumant nos calculs :

Modélisation sur la base de 20% de transfert du CO2 vers les océans au bout de 10 ans (en Gt de C)				
Année	C fossile rejeté dans l'atmosphère	C restant dans l'atmosphère après transfert de 20%/10ans vers les océans	C constaté par les mesures de l'atmosphère	Ecart
1900	13	-	25	-
10	20	36	32	+4
20	29	38	36	+2
30	39	40	44	-3,5
40	50	44	50	-6
50	63	48	57	-9
60	84	59	69	-10
70	117	80	82	-2
80	165	112	111	+1
90	222	147	143	+4
2000	285	180	176	+4

Il convient d'ajouter que la courbe des rejets de CO2 ne tient pas compte des apports de la déforestation, tandis que celle des teneurs de l'atmosphère en gaz carbonique les intègre. Ce qui peut expliquer certains légers écarts.

On constate en effet des écarts négatifs par rapport à notre hypothèse pour la période 1930-1970. Autrement dit durant cette période on a constaté par les mesures directes du CO2 dans l'atmosphère des chiffres supérieurs à ceux donnés par notre modèle. Ce qui signifie qu'il y a eu des apports de C autres que ceux correspondant au C fossile. Tout porte à penser que nous constatons là l'apport de la déforestation, qui a donc dû particulièrement sévir pendant cette période.

Notons, pour terminer, qu'on peut donner une justification théorique à notre hypothèse de départ. En effet à l'interface atmosphère-océans les échanges de molécules de CO2 s'équilibrent normalement. Si la densité de molécules de CO2 augmente dans l'atmosphère, elle augmente à due proportion à l'interface puisque la hauteur de l'atmosphère n'a pas changé pour autant. Et comme on peut supposer que la probabilité pour une molécule de CO2 de franchir l'interface reste constante, on retrouve notre hypothèse de départ, à savoir qu'au bout d'un certain temps la proportion de molécules en surnombre franchissant l'interface est proportionnelle à ce laps de temps.

Ainsi, s'il reste dans l'atmosphère 80% de nos rejets au bout de 10 ans, il en restera 64% au bout de 20 ans, 33% au bout de 50 ans ... et 10% au bout d'un siècle.

## CONCLUSIONS

1. Nous avons montré qu'il est possible de **raccorder quantitativement** l'historique de la **teneur en CO<sup>2</sup> de l'atmosphère** avec l'historique **des quantités de carbone fossile brûlés**, bien qu'il s'agisse de grandeurs de natures a priori différentes.

2. Les résultats confirment ce que l'on pouvait attendre, à savoir que la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère varie avec le tonnage des combustibles fossiles brûlés, et dans une moindre mesure avec la déforestation. Mais avec un écart croissant avec le temps.

On aurait pu pourtant s'attendre à ce que la vitesse d'absorption du CO<sup>2</sup> par les océans ou les terres soit lente et que par conséquent le CO<sup>2</sup> d'origine fossile, déversé brutalement en masse, se retrouve aujourd'hui stocké presque intégralement dans l'atmosphère.

Tel n'est pas le cas puisque, au contraire, la courbe de la figure 1 montre qu'une **part croissante du CO<sup>2</sup> d'origine fossile disparaît avec le temps, à mesure que la teneur en CO<sup>2</sup> de l'atmosphère augmente.**

3. Comment alors interpréter ce résultat ?

**La rapidité du phénomène** laisse à penser que ce sont **les océans qui sont en jeu**, les terres, en moins grande surface d'ailleurs, étant vraisemblablement moins réactives à l'échelle de temps en cause.

4. Considérons donc ces deux milieux, l'un gazeux et l'autre liquide, qui sont en contact sur une surface commune.

Dans chacun de ces milieux le CO<sub>2</sub> présent engendre une pression interne. Il y a donc une pression interne du CO<sub>2</sub> dans les océans et une autre dans l'atmosphère.

En période stable, ces deux pressions s'équilibrent. C'est ce qui se passait dans les siècles antérieurs au 19<sup>e</sup> siècle.

Or la pression partielle du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère est proportionnelle à la quantité qui s'y trouve, puisque l'atmosphère reste à volume constant. Si donc on injecte du gaz carbonique dans l'atmosphère sa pression interne va augmenter. Un flux de CO<sub>2</sub> doit alors logiquement s'écouler vers les océans. Mais comme le stock de carbone des océans est d'un tout autre ordre de grandeur, bien plus important que celui qui nous intéresse ici, la pression interne dans l'eau ne sera quasiment pas modifiée par cet arrivage.

**On peut donc prévoir que, peu à peu, les excédents de gaz carbonique de l'atmosphère finiront par être absorbés quasiment en totalité par les océans.**

5. Mais après tout n'est-ce pas tout simplement, à l'échelle de la planète, ce qui se passe dans une bouteille d'eau gazeuse ?

Les ingrédients sont les mêmes : de l'eau, de l'air, du gaz carbonique. Le verre de la bouteille est simplement remplacé par une paroi invisible : l'attraction terrestre. Or on sait qu'en cas d'injection de gaz carbonique dans la bouteille la diffusion de ce gaz dans l'eau est très rapide, et conduit à un nouvel équilibre.

Il n'y a donc rien d'étonnant à ce que les équilibres entre l'atmosphère et les océans s'établissent **rapidement**, non pas à l'échelle des millénaires, mais à l'échelle des années. Nous avons vu à ce sujet que la masse des océans est d'environ 300 fois celle de l'atmosphère et offre donc une possibilité d'absorption du gaz carbonique considérable.

Pour en revenir à la situation actuelle, nos calculs montrent que tout se passe comme si, **au bout d'une année, environ 2% du CO<sup>2</sup> en excédent dans l'atmosphère avaient été absorbés par les océans.**

Ce qui explique qu'actuellement il ne reste dans l'atmosphère qu'environ 60% du carbone fossile qui y a été déversé depuis 1850.

6. Reste le constat surprenant de **la période 1850-1930**, où, semble-t-il, les courbes se croisent. C'est à dire qu'il y eut un enrichissement en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère supérieur à celui correspondant aux déversements dus à l'activité humaine.

Nous sommes, il est vrai, dans des ordres de grandeur très inférieurs à ceux qui caractérisent la période récente.

Mais les chiffres dont on dispose sont là. En admettant qu'ils soient fiables il y eut **pendant plusieurs décennies un transfert de CO<sup>2</sup> des océans vers l'atmosphère.**

Cela peut peut-être s'expliquer par le fait que le 19<sup>e</sup> siècle fut plus froid que le 20<sup>e</sup> siècle. Or on est en droit de penser que les océans ont une inertie thermique sans aucune mesure avec celle de l'atmosphère, qui pèse 300 fois moins. L'atmosphère étant à cette époque passagèrement plus froide, du CO<sub>2</sub> océanique a donc pu y migrer pour rétablir l'équilibre des pressions partielles.

7. Ainsi donc le rapprochement quantitatif des deux séries de mesures dans le temps dont nous disposons et qui concernent : le tonnage des rejets de carbone d'une part, et la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère d'autre part, permet d'éclairer un peu mieux **le mécanisme de l'équilibre du carbone entre atmosphère et océans.**

Cela permet en particulier de se projeter dans le devenir de ces deux milieux, en fonction de la politique énergétique qui sera suivie par l'humanité.

## Annexe -1-

BASES DE CALCUL RETENUES D'APRÈS LES GRAPHIQUES PUBLIÉS			
Année	ppmv de CO <sup>2</sup> dans l'atmosphère	ppmv base 0 en 1850	Gt de C fossile brûlé depuis 1850
1850	285	0	0
60	286	1	0,5
70	288	3	2,1
80	290	5	4,5
90	294	9	8
1900	297	12	13
10	300	15	20
20	302	17	29
30	306	21	39
40	309	24	50
1950	312	27	63
60	318	33	84
70	324	39	127
80	338	53	165
90	353	68	222
2000	369	84	285

## Annexe -2-

### Conversion en tonnes de carbone de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère

On dispose de deux nombres :

- Le tonnage de l'air de l'atmosphère terrestre, évalué à  $5 \cdot 10^{15}$  tonnes
- La teneur en volume **V** du gaz carbonique, exprimée en ppmv

Le volume de CO<sub>2</sub> étant très faible par rapport à celui de l'air, on peut écrire, une mole de CO<sub>2</sub> pesant 44 et une mole d'air 28,5 :

$$\frac{\text{poids de CO}_2}{\text{poids de l'air}} = \frac{\text{volume de CO}_2 \times 44}{\text{volume de l'air} \times 28,5}$$

$$\text{Poids de CO}_2 = \text{poids de l'air} \times 1,54 \times \frac{\text{volume de CO}_2}{\text{volume de l'air}} = \text{poids de l'air} \times 1,54 \times V \times 10^{-6}$$

**V** étant exprimé en ppmv

Comme le poids du carbone ne représente que 12/44 du poids de CO<sub>2</sub>, on a :

$$\text{Poids de C} = 12/44 \times \text{poids de l'air} \times 1,54 \times V \times 10^{-6}$$

$$\text{Poids de C} = 5 \times 10^{15} \times 0,42 \times 10^{-6} \times V = 2,1 \times 10^{15-6} V = 2,1 \times 10^9 V$$

Si on exprime le poids du carbone **C** en Gt et la teneur en gaz carbonique **V** en ppmv, on a l'expression simple :

$$\mathbf{C = 2,1 V}$$

### Annexe -3-

Cette loi, énoncée en 1803, mesure la solubilité d'un gaz dans un solvant liquide avec lequel ce gaz est en contact. Elle établit que :

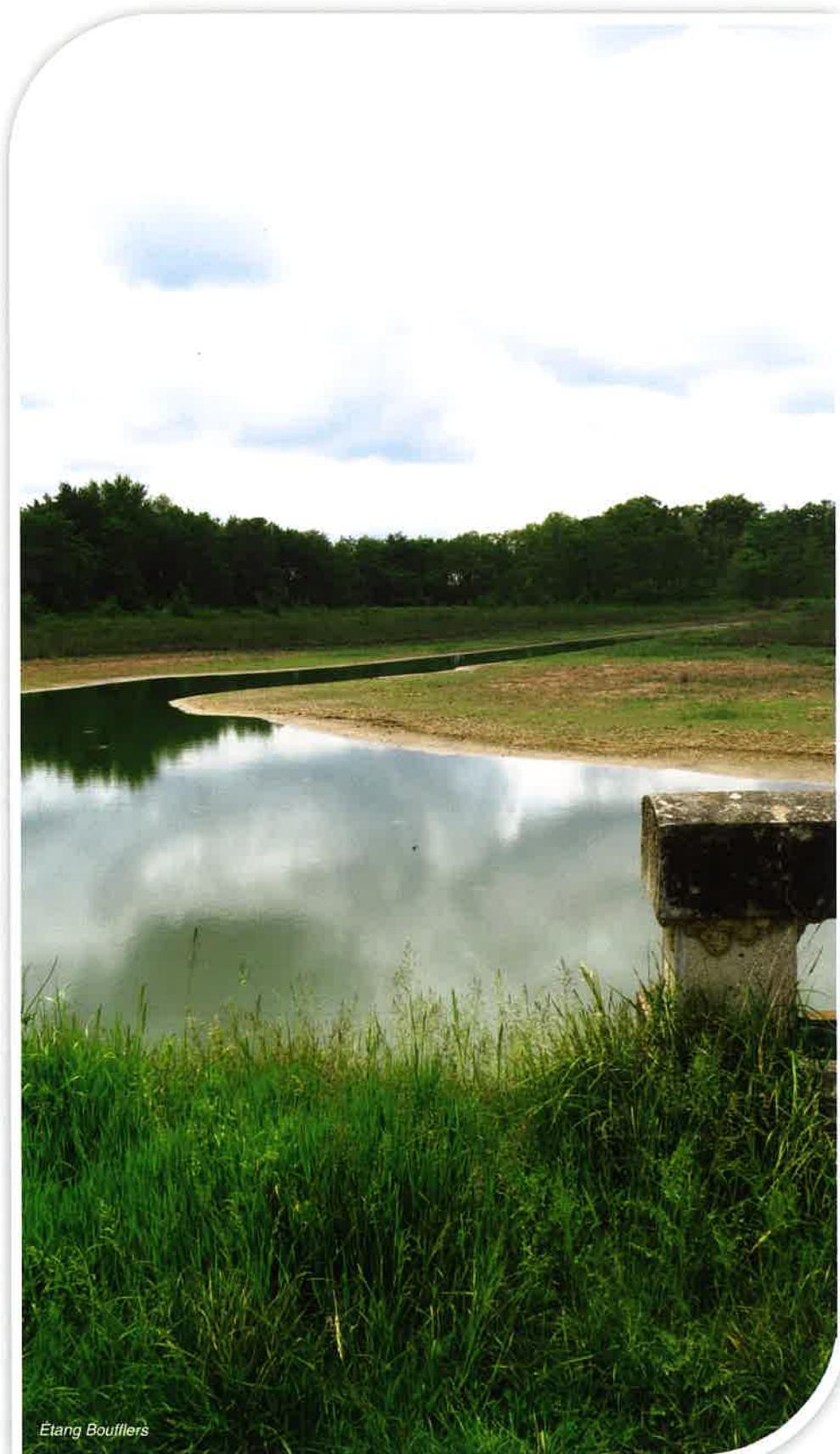
$$\frac{\text{pression du gaz au dessus du liquide}}{\text{concentration de ce gaz en dissolution dans le liquide}} = H$$

H étant une constante.

Cette constante dépend toutefois de la température.

La loi de Henry nous éclaire sur deux points :

- étant donné que la masse de CO<sub>2</sub> dans les océans est considérable, 3.500 Gt selon certains experts, le dénominateur de la loi de Henry sera peu affecté par les 380 Gt, relatifs aux combustibles fossiles. Cela veut dire que le numérateur reviendra à peu près à sa valeur passée une fois les équilibres rétablis. Autrement dit nos descendants devraient retrouver un jour une atmosphère ne contenant pas plus de CO<sub>2</sub> que jadis. À condition qu'ils s'assagissent ...
- la constante de Henry dépend de la température. Cela conforte l'hypothèse que nous avons formulée sur la situation vers la fin du 19<sup>e</sup> siècle : un refroidissement de l'air par rapport à l'eau doit induire un léger transfert du CO<sub>2</sub> de la source chaude, l'océan en l'occurrence, vers la source froide, l'atmosphère.



Étang Boufflers

Responsable de la publication :  
Jean ANDRIOT

Fondation Pierre VÉROTS  
Domaine de Praillebard  
01390 – ST JEAN de THURIGNEUX  
Tél. 04 74 00 89 33 ou 09 64 24 43 84  
Fax 04 74 00 89 27

Email : [fondation.pierre-verots@wanadoo.fr](mailto:fondation.pierre-verots@wanadoo.fr)  
Site Internet : [www.fondation-pierre-verots.com](http://www.fondation-pierre-verots.com)



Impression :

Multitude Imprimerie  
TRÉVOUX (01600)