

LES EXPÉRIENCES DE RUBEN ET KAMEN (1941) À TRAVERS LES MANUELS SCOLAIRES

Babacar Gueye

Les expériences de Ruben et Kamen sont évoquées dans la plupart des manuels de biologie des classes de Première et de Terminale.

À partir d'une étude de la présentation et de l'exploitation de celles-ci à des fins didactiques, nous soulevons les erreurs de contenu et de raisonnement avant de discuter à travers cet exemple d'une meilleure utilisation de l'histoire des sciences dans l'enseignement de la biologie.

l'usage des traceurs est très répandu en biologie

pour l'étude de la photosynthèse ^{18}O a été utilisé

cependant il y a des incohérences dans les manuels

Dans l'étude des processus chimiques fondamentaux de la vie, les scientifiques utilisent depuis très longtemps les isotopes radioactifs ou stables de certains éléments pour marquer des substances qu'ils suivent à la trace. Cette technique a permis de connaître le lieu de synthèse, les différents intermédiaires et les mécanismes de production de beaucoup de substances d'origine animale ou végétale.

C'est ainsi que pour étudier la provenance de l'oxygène dégagé par les plantes vertes durant la photosynthèse Ruben et Kamen ont utilisé l'oxygène 18 (^{18}O) en tant que marqueur de différentes substances susceptibles d'être à l'origine de ce dégagement. Ce sont leurs célèbres expériences que nous retrouvons dans bien des manuels qui abordent le chapitre de la photosynthèse.

Les erreurs et les incohérences que nous avons relevées à travers les manuels, nous ont amené à effectuer un travail de fond pour situer les responsabilités et voir en quoi l'exploitation didactique qui est faite de telles expériences, incomplètement rapportées, contribue ou non à une meilleure formation de l'esprit scientifique chez les élèves.

1. LES FAITS

Document 1 : VINCENT - *Biologie Géologie 1ère S - Vuibert - 1982 - P. 56*

"9. Si l'on fournit à la plante du CO_2 dont l'oxygène est de l'oxygène lourd ^{18}O , l'oxygène dégagé au cours de la photosynthèse est de l'oxygène léger ^{16}O (Ruben 1941).

Si l'on fournit à la plante de l'eau dont l'oxygène est de l'oxygène lourd, l'oxygène dégagé au cours de la photosynthèse est de l'oxygène lourd.

^{18}O est un isotope lourd

Que nous apprennent ces expériences quant au mécanisme de la photosynthèse et que faut-il penser de cette définition relevée dans un livre d'autrefois : "L'assimilation chlorophyllienne est le phénomène par lequel la plante absorbe le gaz carbonique, retient le carbone et rejette l'oxygène" ?"

Document 2 : GOURLAOUEN - Sciences naturelles 1ère S - Hachette - 1982 - P. 38

"b. Les expériences de Ruben et Kamen (1941)

EXERCICE

Des Algues unicellulaires vertes (Chlorelles) sont mises à la lumière en présence d'eau enrichie en eau à oxygène lourd $H_2^{18}O$ (par exemple à 0,85 % de cette dernière) et alimentées par contre en dioxyde de carbone à oxygène léger $C^{16}O_2$ (en fait, en CO_2^3). On analyse l'oxygène dégagé par la culture : il contient de l'oxygène lourd dans une proportion très voisine de celle de $H_2^{18}O$ dans l'eau fournie initialement, bien différente de celle existant dans l'oxygène atmosphérique normal (0,20 % de ^{18}O).

^{18}O est un
isotope lourd

• Que peut-on en conclure ?

Pour vérifier cette interprétation, la contre-expérience a été réalisée : des Chlorelles alimentées en $H_2^{16}O$ et en $C^{18}O_2$ libèrent de l'oxygène qui contient la même proportion de ^{18}O que l'eau fournie.

C'est donc que l'oxygène libéré par les végétaux chlorophylliens à la lumière et en présence de CO_2 provient de l'eau."

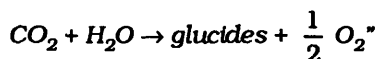
Document 3 : DÉSIRÉ - Biologie Terminale C - Armand Colin - 1983 - P. 162

"**Expérience 2.** On donne à des Chlorelles de l'eau additionnée de CO_2 . Ce dernier contient l'isotope ^{18}O de l'oxygène. L'oxygène dégagé n'est pas radioactif, mais la radioactivité se retrouve dans des molécules organiques. L'oxygène dégagé au cours de la photosynthèse ne provient donc pas de CO_2 . Par contre, **l'oxygène de la molécule de CO_2 est incorporé dans les molécules organiques.**

^{18}O est un
isotope
radioactif

Expérience 3. les Chlorelles sont placées dans de l'eau additionnée de CO_2 ; H_2O contient l'isotope ^{18}O . L'oxygène rejeté est radioactif, mais pas les glucides fabriqués : cette expérience prouve bien que **l'oxygène rejeté est issu de H_2O .**

On peut donc écrire la réaction globale suivante :



Document 4 : TAVERNIER - Biologie Terminale C - Bordas - 1983 - P. 252

"B. PREMIÈRE EXPÉRIENCE

La suspension d'algues, fortement éclairée, est placée dans une eau marquée par l'oxygène radioactif ($H_2^{18}O$). On constate que l'oxygène est dégagé uniquement pendant l'éclairement et qu'il contient de l'oxygène radioactif (^{18}O) dans une proportion voisine de celle de l'eau fournie initialement (expérience de Ruben et Kamen, 1940). Ce dégagement d'oxygène dépend uniquement de la lumière reçue."

^{18}O est un isotope radioactif

2. ANALYSE DES FAITS

Les observations suivantes se dégagent des données extraites des manuels scolaires.

- Dans tous les cas on demande de tirer une conclusion définitive.
- Selon les auteurs l'oxygène 18 (^{18}O) est tantôt un isotope lourd (doc. 1 et 2) tantôt un isotope radioactif (doc. 3 et 4).
- L'oxygène 18 (^{18}O) isotope lourd en 1982, en classe de Première dans les exercices d'évaluation, devient radioactif l'année suivante en 1983, en classe de Terminale dans les mêmes expériences évoquées en apprentissage.

d'un livre à un autre, ^{18}O passe de lourd à radioactif ce qui n'est pas la même chose

On serait alors tenté de croire que "lourd" signifie la même chose que "radioactif" ou que l'oxygène lourd est devenu radioactif. Or les auteurs font souvent référence à Ruben et Kamen, ce qui en aucun cas ne devrait laisser planer le doute ou la confusion. Se pose donc un problème de rigueur dans la démarche de préparation des manuels scolaires, problème qui dans ce cas précis, interpelle l'histoire des sciences, d'où la nécessité d'un retour aux sources.

3. RETOUR AUX SOURCES

La publication des savants (Ruben et al., 1941) apporte une réponse très nette. En effet l'article a pour titre : "*L'utilisation de l'oxygène lourd (^{18}O) en tant que marqueur dans l'étude de la photosynthèse*" (voir annexe). La preuve est ainsi faite que les auteurs des documents 3 et 4 n'ont pas consulté l'article auquel ils font référence dans leurs livres.

Nous avons jugé par la suite, utile d'apporter les précisions suivantes concernant l'oxygène.

^{18}O est en fait un isotope non radioactif de l'oxygène :

"l'oxygène atmosphérique est un mélange des trois isotopes ^{16}O , ^{17}O et ^{18}O dont les concentrations moyennes sont respectivement égales à 99,758 %, 0,0374 % et 0,203 %.

le texte original des savants dit que ^{18}O est un isotope lourd

Ces concentrations varient d'ailleurs suivant la provenance des échantillons. L'isotope ^{18}O peut être obtenu assez difficilement par distillation fractionnée (c'est la technique utilisée par Ruben et Kamen) ou par réactions d'échanges."

Il reste cependant vrai qu'il existe des isotopes radioactifs de l'oxygène qui ont été obtenus par synthèse : ce sont ^{14}O , ^{15}O , ^{19}O (Creuse, 1985).

4. DISCUSSION

dans les manuels les données scientifiques sont souvent tronquées...

Dans les différents manuels étudiés, le discours se borne à faire réfléchir sur l'aspect qualitatif des expériences aussi bien en apprentissage qu'en évaluation. Même si le raisonnement demandé à l'élève semble possible et logique, il est trop rapide et basé sur des données scientifiques insuffisantes dans tous les cas et scientifiquement inexactes dans certains cas.

le quantitatif est très vite gommé

Le problème qui se pose ici est celui du gommage des données quantitatives lors de la transposition didactique.

En relatant ces expériences les auteurs ont non seulement fait table rase de la problématique et de la démarche mais également des arguments scientifiques chiffrés. Or qui dit sciences expérimentales dit quantifier c'est-à-dire mesurer, compter, peser etc.

C'est le quantitatif qui permet de préciser le raisonnement.

Pour remédier à cette situation de carence nous pensons qu'il faudrait bannir des livres scolaires cette histoire allusive et opportuniste qui permet seulement de poser des raisonnements en ignorant la réalité scientifique.

il faudrait une reproduction complète des textes originaux pour éviter les erreurs et omissions car...

L'étude détaillée de l'article de Kamen et Ruben (Ruben et al. 1941) qui du reste n'est pas long, nous paraît beaucoup plus féconde et intéressante sur le plan didactique.

Non seulement la reproduction du texte original donnerait moins prise à des modifications et à des manipulations malheureuses, mais permettrait aussi de ne pas trop *"désincarner les connaissances et les méthodes scientifiques et de ne pas leur faire perdre toute valeur formatrice en oubliant d'enseigner les conditions de leur naissance, les questions auxquelles elles prétendent répondre, les fonctions pour lesquelles les concepts et les méthodes de la science ont été créés"* (Giordan, 1976).

dans cet exemple l'analyse du texte scientifique original est très riche d'enseignement sur la démarche expérimentale...

En effet l'analyse de l'article permet d'en savoir beaucoup sur la technique expérimentale : sur les précautions prises du fait de la délicatesse des différentes opérations ; sur la rigueur et la démarche prudente des savants qui, malgré la pertinence des résultats de leurs expériences (Tableau I), terminent ainsi leur exposé *"il paraît raisonnable de conclure que l'oxygène provient seulement de l'eau"*.

TABLEAU I
(extrait de l'article de Ruben et al. 1941)
Pourcentage d'isotope dans l'oxygène produit lors de la photosynthèse par *Chlorella*^a

Exp. [∞]	Substrat	Temps entre la dissolution KHCO ₃ + K ₂ CO ₃ et le début du recueil d'O ₂ (minutes)	Temps à la fin du recueil d'O ₂ (minutes)	Pourcentage de ¹⁸ O dans		
				H ₂ O	HCO ₃ ⁻ + CO ₃ ⁻	O ₂
1	0.09 M	0		0.85	0.20	..
	KHCO ₃	45	110	.85	.41 ^b	0.84
	+ 0.09 M K ₂ CO ₃	110	225	.85	.55 ^b	.85
2	0.14 M	0		.85	.61	.86
	KHCO ₃	40	110	.20	.50	.20
	+ 0.06 M K ₂ CO ₃	110	185	.20	.40	.20
3	0.06 M	0		.20	.68	..
	KHCO ₃	10	50	.20		.21
	+ 0.14 M K ₂ CO ₃	50	165	.20	.57	.20

a. Le volume de l'oxygène produit était grand comparé à celui de l'oxygène atmosphérique présent au début de l'expérience.
b. Ces valeurs sont calculées.

notamment sur la prudence dans les conclusions...

le statut des hypothèses...

les questions après expérience et les hypothèses ad hoc...

Ils ajoutent aussitôt ceci : "Bien que cette conclusion puisse permettre de rejeter la plupart des suppositions faites dans le passé, elle ne permet pas de faire un choix entre les hypothèses les plus récentes". C'est ainsi qu'ils signalent que ces résultats sont intéressants par rapport à l'hypothèse de Van Niel qui suggérait que l'oxygène puisse provenir d'une déshydrogénation de l'eau.

La leçon qui se dégage de tout ceci est qu'en sciences expérimentales il est plus facile de réfuter une hypothèse que de la confirmer.

Au lieu de tomber dans le triomphalisme qui semble être l'apanage des auteurs de manuels, Ruben et Kamen se posent à nouveau des questions plus que pertinentes car si elles recevaient des réponses affirmatives elles viendraient à remettre en cause la conclusion précédente. Il s'agit de savoir si oui ou non, d'une part, le dégagement d'oxygène pendant la photosynthèse était réversible ? D'autre part, si les réactions d'oxydation respiratoire utilisant l'oxygène étaient, elles aussi, réversibles ?

Il est clair que la réversibilité de l'une ou l'autre de ces réactions enlèverait toute signification aux mesures déjà effectuées.

Toutes les expériences nécessaires ont été effectuées et sont exposées dans l'article.

D'où la seconde leçon qui est celle de **la rigueur expérimentale à observer en direction des hypothèses ad hoc qu'il faut battre en brèche pour pouvoir continuer à maintenir l'hypothèse première.**

les contre-
expériences etc.

La troisième leçon qui découle de cette analyse est que **chacune des expériences de Ruben et Kamen est accompagnée d'une contre-expérience.** C'est ainsi par exemple que dans un premier temps *"De jeunes cellules vivantes de chlorelles sont mises en suspension dans l'eau à oxygène lourd (¹⁸O) contenant du bicarbonate de potassium et du carbonate ordinaire et dans un deuxième temps les algues sont amenées à effectuer la photosynthèse dans de l'eau ordinaire contenant du bicarbonate de potassium et du carbonate à oxygène lourd"* (Ruben et al., 1941).

Sans doute n'avons-nous pas tiré toutes les leçons qui se dégagent de l'analyse de l'article de Ruben et Kamen, mais ce que nous venons de montrer et qu'il est tout à fait possible de faire avec des élèves, nous semble très formateur dans la mesure où cela aide à *"réduire l'écart entre le savoir savant et le savoir enseigné et à orienter les élèves vers une appropriation progressive de méthodes et de savoirs qui ne défigurent pas le savoir et les méthodes des savants"* (Drouin, 1985).

CONCLUSION

les manuels
scolaires
contiennent des
erreurs

L'un des premiers éléments qui se dégage de cette étude, et qui n'est pas le moindre, est que tout ce qui est écrit dans un manuel imprimé, n'est pas nécessairement vrai. Il y a des erreurs dans les manuels scolaires et il est bon d'en être conscient.

d'où la nécessité
de faire
attention, de
vérifier parfois à
la source...

Nous avons également montré que *"remonter aux sources c'est clarifier les idées, aider la science au lieu de la paralyser"* (Langevin, 1931) ; c'est aussi un moyen de combattre cette forme dogmatique de l'enseignement qui, malgré les apparences, est encore dominante dans les livres, du fait de ces bribes d'expériences décontextualisées qu'on y trouve exposées, et à partir desquelles on demande de faire un raisonnement rapide et définitif.

mieux, d'aborder
l'histoire des
sciences d'une
autre manière
dans les manuels
scolaires

Même si l'étude de l'histoire des sciences n'est pas la panacée en matière d'initiation à la démarche expérimentale, elle peut y contribuer grandement de par le transfert de mode de questionnement et de raisonnement qui en résulte. Cependant l'avènement d'une telle démarche historique dans l'enseignement mérite quelques préalables :

ce qui demande
quelques
changements...

- une meilleure formation des professeurs dans laquelle l'étude de l'histoire de la discipline prendrait toute sa place à travers l'analyse des mémoires originaux des savants, ce qui permettrait sans doute aux futurs enseignants de mieux se rendre compte de "l'extrême richesse au niveau des modes de pensée de la démarche expérimentale qui conduit à valoriser pensée inductive, déductive, dialectique, divergente et analogique" (Develay, 1988) ;
- une autre conception des manuels scolaires dans laquelle l'histoire des sciences ne sera plus escamotée ;
- un allègement des programmes, surtout dans les classes d'examen où les professeurs croulent sous le poids des connaissances, et sont obligés d'être de simples narrateurs des résultats de la science, au lieu d'être les initiateurs de la démarche expérimentale chez les élèves.

Nous pensons que les programmes doivent être redéfinis en terme de concepts-clés, de mode de pensée et de savoir-faire clairement spécifiés pour chaque domaine de connaissances.

En fait ce sont les programmes qui constituent la nouvelle bastille à prendre ce qui nécessite comme chacun le sait une révolution.

Babacar GUEYE
École Normale Supérieure
de Dakar (Sénégal)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CREUSE R. (1985). "Oxygène" in *Encyclopaedia Universalis Corpus 13*, pp. 844-849.
- DÉSIRÉ C. (1983). *Biologie - Géologie - Terminale C*, Paris, A. Colin, p. 162.
- DEVELAY M. (1988). "Sur la méthode expérimentale" in *ASTER n° 8*, pp. 1-15.
- DROUIN A.M. (1985). "Sur la notion de contrat didactique" in *ASTER n° 1*, pp. 29-56.
- GIORDAN A. (1976). "Présentation de la commission 'Initiation expérimentale' " in *Bulletin de liaison des C.E.S. expérimentaux n° 12*, INRP, p. 17.
- GOURLAOUEN J. (1982). *Sciences Naturelles 1ère S.*, Paris, Hachette, p. 38.
- KAMEN M.D. (1951). *Radioactive tracers in Biology*, 2nd ed., New York, Academic Press, 429 p.
- LANGVIN P. (1931). *La pensée et l' action*, Paris, Éditions sociales, p. 200.
- PRIVAUT D. (1958). "Rôle des livres dans l'enseignement des Sciences naturelles" in *Bulletin de l'U.D.N. n° 3*, pp. 183-191.

RUBEN S., RANDALL M., KAMEN M et HYDE J.L. (1941). "Heavy oxygen (^{18}O) as a tracer in the study of photosynthesis" in *Journal of the American Chemical society* n° 63, pp. 877-879 (Cf. traduction en annexe ci-dessous).

TAVERNIER, R. (1983). *Biologie - Terminale C*, Paris, Bordas, p. 252.

VINCENT P. (1982). *Biologie - Géologie 1ère S*, Paris, Vuibert, p. 56.

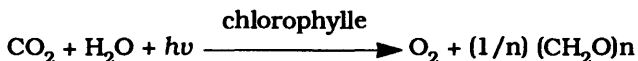
ANNEXE

Traduction de l'article paru dans le *Journal of the American chemical society* (mars 1941), pp. 877-879

L'utilisation de l'oxygène lourd ^{18}O comme marqueur dans l'étude de la photosynthèse

PAR SAMUEL RUBEN, MERLE RANDALL, MARTIN KAMEN
ET JAMES LOGAN HYDE

Il est généralement admis que le bilan de la photosynthèse chez les plantes vertes peut être représenté par cette équation :



et également que nous savons peu de choses du mécanisme-même.

Il serait intéressant de savoir comment et à partir de quelle substance l'oxygène est produit. En utilisant ^{18}O comme marqueur nous avons découvert que l'oxygène qui se dégage lors de la photosynthèse provient plutôt de l'eau que de dioxyde de carbone.

L'eau à oxygène lourd utilisée dans ces expériences a été préparée par distillation fractionnée, puis raffinée à partir de permanganate alcalin avant d'être employée. La quantité d'oxygène isotopique a été déterminée par la méthode de Cohn et Urey qui utilise le dioxyde de carbone et un spectromètre de masse.

Du carbonate à oxygène lourd a été préparé en permettant à une solution de carbonate acide de potassium (KHCO_3) dans de l'eau à oxygène lourd d'arriver à un équilibre isotopique approximatif, en ajoutant une quantité presque égale d'hydroxyde de potassium et en éliminant l'eau puis finalement en séchant au four à 120° . L'analyse isotopique de ce carbonate seul ou en solution a été effectuée en rendant la solution suffisamment alcaline pour empêcher tout échange et en précipitant le carbonate de calcium. Le carbonate de calcium après avoir été filtré, lavé et séché à 120° est chauffé au rouge dans un ballon de platine vide, relié au système de transmission de gaz du spectromètre de masse, et le dioxyde de carbone dégagé analysé quant à son taux d'oxygène lourd.

De jeunes cellules vivantes de *Chlorelles* sont mises en suspension dans l'eau à oxygène lourd (0,85 % de ^{18}O), contenant du bicarbonate de potassium ordinaire et du carbonate. Dans ces conditions l'échange d'oxygène entre l'eau et l'ion bicarbonate est lent et facilement mesurable. Le pourcentage isotopique de l'oxygène dégagé est mesuré avec un spectromètre de masse. Dans d'autres expériences les algues sont amenées à effectuer la photosynthèse dans de l'eau ordinaire contenant du bicarbonate de potassium à oxygène lourd et du carbonate. Les résultats de ces expériences sont résumés dans le tableau I*.

Il est clair que la proportion de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de l'oxygène dégagé est identique à celle de l'eau. Puisque l'oxygène des groupements OH, COOH, O-O, C=O, etc., n'échange que très lentement avec l'eau à la température ambiante et à un pH modéré, il paraît raisonnable de conclure que l'oxygène provient seulement de l'eau.

Bien que cette conclusion puisse permettre de rejeter la plupart des suppositions faites dans le passé, elle ne permet pas de faire un choix entre les différentes hypothèses les plus récentes. Cependant il est intéressant de noter que Van Niel a précisément suggéré que l'oxygène puisse provenir d'une déshydrogénation de l'eau.

Nous avons aussi essayé de vérifier si le dégagement d'oxygène était une réaction réversible. Les algues sont mises en suspension dans une solution de bicarbonate de potassium ordinaire et de carbonate, et amenées à faire la photosynthèse en présence d'oxygène lourd. Dans d'autres expériences les algues ont dégagé de l'oxygène lourd en présence d'oxygène léger. Les résultats sont montrés par le tableau II.

TABLEAU II
Pourcentage d'isotope dans l'oxygène produit lors de la photosynthèse par *Chlorella* en présence d'oxygène

O ₂ présent dans l'espace gazeux au début (ml)	O ₂ produit lors de la photosynthèse par 200 mm ³ d'algues (ml)	Pourcentage d'O ₂ à la fin de l'expérience	
		observé	calculé pour aucun échange
2.29 ($^{18}\text{O} = 0,20\%$)	1.55 ($^{18}\text{O} = 0,85\%$)	0,43	0,46
3.64 ($^{18}\text{O} = 0,20\%$)	1.18 ($^{18}\text{O} = 0,85\%$)	0,34	0,36
1.44 ($^{18}\text{O} = 0,85\%$)	0.73 ($^{18}\text{O} = 0,20\%$)	0,59	0,62
4.81 ($^{18}\text{O} = 0,85\%$)	1.22 ($^{18}\text{O} = 0,20\%$)	0,69	0,71

Il n'y a aucun signe de réactions d'échange impliquant de l'oxygène. Les erreurs expérimentales sont telles qu'un échange incorporant moins de $5 \cdot 10^{-8}$ moles d'oxygène par ml de solution d'algues ne serait pas détecté.

* tableau présenté dans l'article page 79.

Des expériences similaires avec des *Chlorelles* et des levures ont été effectuées afin de voir si les réactions d'oxydation (respiration) utilisant l'oxygène étaient réversibles. Les résultats sont résumés dans le tableau III.

TABLEAU III
Pourcentage d'oxygène isotopique dans la respiration avec *Chlorella* et levure

Système respirant	O ₂ (¹⁸ O = 0,85 %) présent au début de l'expérience (ml)	O ₂ utilisé dans la respiration (ml)	Pourcentage d' ¹⁸ O dans O ₂ à la fin de l'expérience	
			observé	pour aucun échange
Cellules de <i>Chlorella</i> dans le noir pendant 90 minutes	0,82	0,11	0,85	0,85
Cellules de levure pendant 60 minutes	4,5	2,4	0,84	0,85

Ici aussi il n'y a pas d'indications quant à une réaction d'échange impliquant l'oxygène moléculaire.

CHEMICAL LABORATORY, AND
RADIATION LABORATORY
UNIVERSITY OF CALIFORNIA
BERKELEY, CALIFORNIA

Reçu le 23 janvier 1941

Traduction par Babacar Gueye

La nomenclature de l'époque a été conservée.