

LAVOISIER, PRIESTLEY, LE PHLOGISTIQUE ET L'OXYGÈNE

de l'étude de controverse à la réplication pédagogique

Jean-Paul Gaudillière

Utiliser l'histoire de la chimie pour enseigner la chimie est une perspective souvent évoquée, au nom des homologues supposées entre les processus d'apprentissage et les étapes d'élaboration des savoirs, mais rarement pratiquée. Une exception notable est la découverte de l'oxygène au XVIIIème siècle, que l'on a associée à l'enseignement des notions d'oxydation, de combustion et/ou d'élément. L'histoire utilisée est le plus souvent centrée sur l'expérience de calcination du mercure et de réduction de la chaux mercurique pratiquée par Lavoisier qui est considérée comme cruciale et ayant emporté la décision. Cette image de la découverte est historiquement contestable et sans grand bénéfice pédagogique. Des historiens et enseignants britanniques ont proposé une autre approche, centrée sur la réplication pédagogique des controverses. L'enjeu est d'aborder les conflits socio-cognitifs sous-jacents à l'apprentissage en utilisant les matériaux d'une histoire des sciences plus attentive aux situations d'incertitude et de choix, aux pratiques de laboratoire et aux contextes socio-culturels. On introduit ici les travaux historiques récemment consacrés aux activités de Lavoisier et Priestley ainsi qu'au débat sur le phlogistique et l'oxygène. On aborde ensuite les problèmes posés par leur exploitation dans un cours de chimie.

PRÉAMBULE

Un lycée polyvalent du nord de la France. Une classe de terminale F7 attend dans le couloir avant une séance de travaux pratiques de biochimie. À l'ordre du jour, la lecture de deux textes sur la fermentation alcoolique. Les commentaires vont bon train sur le vocabulaire incompréhensible : diastases, sucre inverti, teinte de passage, principe azoté... De fait les deux textes datent des années 1860, l'un est de Louis Pasteur, l'autre de Marcellin Berthelot. L'un plaide pour une interprétation chimique de la fermentation alcoolique, l'autre pour une explication microbienne de la production d'alcool. Temps de l'action : printemps 1988. Contexte : le Projet d'Action Éducative sur Pasteur associant les enseignants de philosophie, chimie et biologie.

Les élèves entrent en salle de travaux pratiques. Le professeur annonce qu'on va reproduire les expériences de Berthelot sur la saccharase de levure. Murmures sur le programme et le bac qui cèdent rapidement devant les explica-

dans le cadre
d'un P.A.E.
sur Pasteur

tions suggérant qu'on va par là retrouver beaucoup de choses sur les enzymes... charbonnier reste maître chez soi. La séance se déroule plutôt bien : peu de casse, tous les réactifs préparés à l'avance (par les techniciens) semblent au point, l'extraction de l'enzyme menée collectivement, c'est-à-dire par le professeur, avec une succession de broyage, centrifugation, précipitation, recentrifugation... donne même une préparation raisonnablement active.

réplication des
expériences de
Berthelot

On passe à la partie historique... et à la comparaison entre l'hydrolyse par la diastase et l'hydrolyse acide. Pour limiter les débats, le protocole de Berthelot a été réécrit pour "coller" avec les instruments utilisés ce jour : polarimètre, liqueur de Fehling. Témoins, variation des conditions de température, variation des quantités de saccharose, d'extrait enzymatique, d'acide succinique. Les propositions de modes opératoires émergent sans trop de difficultés de la lecture et des fragments retenus d'un récent cours d'enzymologie. Certes, il faut éliminer d'un revers de la main quelques propositions "saugrenues" (notamment l'idée de "tuer l'enzyme avec l'acide", on appréciera l'adéquation au contexte), mais tout démarre sans heurts. Deux heures plus tard toutes les incubations sont en route et les résultats s'accumulent jusqu'à la sonnerie libératrice.

il n'y a pas que
de bons témoins

Le lendemain à huit heures : reprise du travail. On effectue les dernières mesures au polarimètre et on dose les sucres réducteurs. La séquence prévoit de les discuter et de relire les textes de référence avant de lancer la seconde partie (un début de caractérisation chimique de l'enzyme). Chaque groupe vient écrire ses résultats au tableau. La situation devient confuse. Les solutions de sucre et d'acide succinique supposées montrer l'absence d'hydrolyse par les acides organiques à froid ont manifestement réagi. Réécriture des résultats, erreurs de manipulation... Avec un peu de doigté, on rétablit quelques cas mais il reste une série complète de témoins qui témoignent très mal... Pas moyen d'accuser les solutions de départ : aucune corrélation avec les diverses bouteilles... Pas moyen d'accuser le chauffage : les tubes sont restés dans un coin... On pourrait s'en sortir avec une erreur de numérotation... mais les élèves responsables ne veulent pas en entendre parler... Heureusement, le reste du groupe commence à faire pression dans le même sens, de plus le texte de M. Berthelot est là pour confirmer l'autorité du dire enseignant. Bref, la situation pédagogique est sauvée même si le modèle de constat des "faits d'expérience" se transforme en travail d'élimination des canards boiteux humains ou matériels.

La réplication une fois acceptée, on revient aux textes. La présentation de l'opposition entre catalyse biologique et effet de l'acide se déroule sans heurts : les rôles de la température, des concentrations... sont précisés conformément au modèle de cours. Le retour sur la discussion Pasteur/Berthelot est plein d'imprévu : Pasteur en prend pour son grade de ne pas avoir cru aux enzymes, je veux

la position de
Pasteur à bien
resituer dans son
époque

dire aux "diastases alcooliques"... Une intervention des autorités s'avère nécessaire pour rétablir un peu de distance et rappeler que les chimistes du milieu du XIXème siècle ne pouvaient pas rendre compte de la fermentation elle-même, sauf à postuler l'existence de diastases non isolées et qu'il a fallu attendre les recherches de Buchner pour obtenir une fermentation alcoolique à partir d'extraits de levure. Une fois le point ostensiblement accepté (voir la qualité du silence qui s'ensuit), un habile renvoi au prochain cours de philo où sera abordée plus globalement cette opposition entre vitalisme et chimisme permet de revenir à la deuxième série de manipulations.

Quinze jours plus tard. Tard dans la soirée, le professeur est à sa table de travail avec les copies du dernier contrôle de biochimie. La question "*Qu'est-ce qu'un enzyme ?*" est un franc succès : pour quelques "*une protéine catalysant une réaction chimique*" et quelques "*catalyseurs biologiques*" il trouve une foule de "*diastases*", de "*super-acides*", de "*microbactéries qui catalysent une réaction chimique*". La question "*Quelles sont les caractéristiques de la catalyse biologique ?*" est plus rassurante même si on y trouve de bien inquiétantes affirmations sur la vie des catalyseurs ("*les enzymes agissent à très petite dose et se divisent pendant la réaction*", ou "*les enzymes sont tués par la température*") et sur le chimisme du vivant (la catalyse biologique, "*c'est comme une réaction chimique mais en plus complet*").

1. POURQUOI PARLER D'HISTOIRE DE LA CHIMIE ?

La réaction chimique est une entité complexe, associant divers niveaux de pratiques expérimentales et de représentations. L'enseigner est loin d'être une opération triviale... surtout lorsqu'on en vient à associer chimie et organismes vivants, lorsque deux modes de représentation (et deux contextes disciplinaires) se heurtent dans l'esprit des élèves comme dans le nôtre. L'expérience ci-dessus partait de l'idée selon laquelle utiliser l'histoire de l'enzymologie illustrerait la difficile genèse des savoirs et apporterait des matériaux favorisant la compréhension des réactions chimiques du vivant et de leurs spécificités. Le premier objectif fut certainement atteint, le second probablement pas.

Était-ce la faute des enseignants, de l'histoire choisie, ou plus généralement de l'incompatibilité entre les objets et méthodes de l'histoire des sciences et les contraintes de l'enseignement scientifique ? Il y a quelques années, ma réponse aurait consisté à plaider pour un dialogue destiné à produire une histoire des sciences en prise sur les enjeux didactiques. Aujourd'hui, fort de la participation à quelques expériences difficiles (dont la séquence ci-dessus), je répondrais volontiers par un constat d'incompatibilité car, à la

l'histoire des
historiens et celle
des chimistes

différence des enseignant(e)s, l'historien(ne) des sciences ne s'occupe pas (ou pas uniquement) des savoirs constitués : il s'occupe des savants, de leur vie sociale, culturelle, de leurs idées, de leurs laboratoires avec toutes les caractéristiques qui en font des lieux d'action. Lorsqu'il est question des concepts ou des expériences, il s'agit de productions situées dans le temps et l'espace ; il est question d'incertitude, de futur ouvert et de connaissances non stabilisées. Bref, la matière de l'historien, c'est **le temps et le changement, pas la vérité** à transmettre.

Il faudrait donc écarter toute interrogation du type : "À quoi l'histoire de la chimie peut-elle servir pour l'enseignement de la réaction chimique ?" comme une question mal posée et la remplacer par une question du type : "Qu'est-ce que l'histoire de la chimie nous apprend sur les conditions d'existence de quelque chose comme la réaction chimique ?". En conséquence, la place de l'histoire de la chimie serait avec les cours d'histoire ou de philosophie, pas dans les cours de chimie. L'introduction de l'histoire des sciences dans l'enseignement relèverait donc de deux types de démarche. D'abord, apporter des éléments de culture générale aux futurs praticiens de la science - de même que l'histoire politique donne une bonne discipline de réflexion aux futurs parlementaires ou diplomates. Il faudrait ainsi développer les séquences historiques dans les cours de philosophie pour mieux illustrer les procédures de découverte et les notions d'épistémologie. La seconde fonction devrait être de contribuer à la culture historique. Ainsi, connaître ce que la République a fait de ses savants et ce qu'ils ont fait de la République participerait de l'étude de la Révolution Française. De même, une présentation pédagogique de la deuxième révolution industrielle qui parle de l'électricité et de la production de masse devrait parler de l'électromagnétisme et des laboratoires de physique.

Régler la question de l'usage didactique de l'histoire des sciences par un simple déni est toutefois peu satisfaisant. Le propos sera ici de voir si on ne peut malgré tout pas mélanger les genres en acceptant de parler sérieusement d'histoire, c'est-à-dire des savants du passé et de leurs activités, sans pour autant abandonner les objectifs propres à un apprentissage de la chimie contemporaine. De savoir si on ne peut pas accepter les contraintes de la situation d'enseignement pour introduire les matériaux historiques comme des ressources permettant de construire des parcours pédagogiques ouverts, ne débouchant pas nécessairement sur une acquisition de connaissances mais sur la familiarisation avec des objets, des problèmes et des méthodes. Pour cela, on partira d'un exemple qui a été beaucoup plus travaillé aussi bien par les didacticiens et pédagogues que par les historien(ne)s (en particulier britanniques), à savoir la découverte de l'oxygène ou plutôt des débats qui, à la fin du XVIIIème siècle, mettent en scène l'oxygène et le phlogistique (1).

l'histoire de la chimie à n'aborder qu'en cours d'histoire ou de philosophie ?

... et pourquoi pas en cours de chimie ?

2. LE CONCEPT D'OXYGÈNE ET LA RÉACTION CHIMIQUE : ANATOMIE D'UN RÊVE PÉDAGOGICO-HISTORIQUE

En 1987, l'association britannique pour l'éducation scientifique avait organisé à Oxford une conférence sur l'enseignement de l'histoire des sciences dont le bilan aussi bien du côté des enseignant(e)s de science que des historien(ne)s était particulièrement pessimiste quant à la possibilité de passer de quelques expériences volontaristes isolées à des approches en "grandeur nature" (2). Deux ans plus tard, l'histoire des sciences entrait dans le programme national impulsé par le gouvernement de Margaret Thatcher (3). Non pas comme un outil pour l'enseignement des sciences mais comme moyen d'une approche critique de la science : pour mieux connaître la nature des idées scientifiques en abordant leurs conditions d'élaboration et les contextes d'application (4). On peut sans doute expliquer cette innovation par le fait qu'en Grande-Bretagne l'histoire des sciences est devenue une affaire d'historiens et de sociologues plus que de scientifiques ou de philosophes. Le plus important est toutefois qu'elle illustre un **pas de côté** par rapport à la vision utilitariste des relations entre histoire des sciences et pédagogie qui voulait que l'histoire serve en montrant comment, dans le passé, des difficultés similaires à celles des apprenants d'aujourd'hui ont pu être surmontées.

L'idée selon laquelle la "psychogénèse" des notions et concepts récapitule leur "genèse historique" a parfois pris des formes extrêmement schématiques (5). Son intérêt tient toutefois aux études de cas illustrant la complexité des résonances entre "obstacle épistémologique" (historique) et obstacle "socio-cognitif" (pédagogique) (6). Ces explorations des conceptions spontanées des apprenants, de leur agencement en réseau et en systèmes de connaissances ont permis de prendre la mesure des conflits qui résultent des résistances aux connaissances scolaires sans se contenter de constater qu'il y avait là quelque chose qui s'opposait à l'enseignement et dont il convenait seulement de **se débarrasser**. L'ambition est désormais d'identifier ces idées et modes de pensée pour construire une **démarche d'utilisation et de contournement**. En d'autres termes, il convient de remplacer une pédagogie spectaculaire, purement démonstrative, par une pédagogie de parcours et de découverte, de redonner une place à l'errance en utilisant les erreurs comme jalons d'un parcours cognitif. L'histoire peut alors intervenir de deux façons. D'une part, elle révèle toute la complexité des processus de cristallisation de connaissances et rend plus visibles les conflits liés à la définition d'un savoir. D'autre part, de façon plus ciblée, elle donne des matériaux pédagogiques basés sur les analogies qui peuvent exister entre les représentations spontanées d'il y a un ou plusieurs siècles et celles d'aujourd'hui, sans pour

l'histoire des sciences dans le programme scolaire en Grande-Bretagne

conflit historique et conflit pédagogique

autant tomber dans une typologie simpliste des stades ou des archétypes de l'esprit humain.

2.1. La combustion et l'oxygène des adolescents

On peut illustrer ces analogies avec la description spontanée d'une combustion par des adolescent(e)s britanniques (7). C'est une affaire de flammes et de fumée, de noircissement et de cendres. Les flammes "*mangent*" ou "*fondent*" le bois ou le charbon. Les affinités entre principes ne sont pas loin : si les soufflets servent à quelque chose, c'est parce que "*le feu aime l'air*". La culture des adolescent(e)s est toutefois loin d'être aussi animiste et élémentaire, ils savent que quelque chose dans le bois disparaît quand il brûle ("*la matière du bois est changée en fumée et ce qui reste c'est les cendres*") et les éléments chimiques sont là ("*le carbone sort du bois*" ; "*le feu a besoin d'oxygène*"). Mieux encore, la technologie contemporaine a souvent quelque importance dans les représentations, après tout, nombre d'adolescents savent qu'il existe des fusées ayant des moteurs "à oxygène" !

les conceptions
spontanées de la
combustion

Une enquête menée par J. Knox révèle avec plus de précision une des difficultés classiques de compréhension du rôle de l'air dans les combustions : le problème des transferts de masse au cours de la réaction avec l'oxygène et la formation d'un corps composé (8). Une des questions posées à des élèves de quinze ans ayant ou non suivi un cours de chimie consistait à estimer le poids d'un échantillon de limaille de fer soumis à oxydation. Un quart des élèves indiquent un poids supérieur après réaction. L'idée selon laquelle la limaille perd du poids est de loin la plus populaire. Elle est justifiée par le chauffage, la combustion des gaz, l'aspect de la poudre restante ou même parfois par le fait que l'oxygène "*déplace le fer*". Les adolescents mentionnent aussi souvent la combinaison avec l'oxygène de l'air que les changements d'états physiques ("*la poudre est plus solide que la limaille de fer*"). Dans leurs conclusions, les auteurs indiquent que la prévalence de cette perte de poids peut être mise en rapport avec un complexe de représentations "spontanées" : le fait qu'un gaz ne réagit pas, qu'il n'a pas nécessairement une masse, que le poids change avec l'aspect (poudre contre solide compact), que la masse d'un corps diminue avec le chauffage... Ces notions subissent des réaménagements après le cours de chimie mais elles ne disparaissent pas. Ainsi la calcination est rapprochée de l'oxydation spontanée à l'air (la rouille), de sorte que l'oxygène "*digère*" les métaux. De même, l'évaporation ou la dissolution dans l'eau viennent au secours de la notion de réaction avec l'air (l'oxygène de l'air se "*fond*" dans le métal).

Ces études suggèrent l'existence d'un réseau conceptuel dont la constitution dépend des itinéraires cognitifs des individus, dépend de la structure des groupes scolaires et des catégories sociales. Un tel réseau associe un petit nombre d'expériences valorisant les analogies entre calcina-

tion et combustion, entre combustion et respiration, entre réaction chimique et processus vivant. L'existence de réseaux conceptuels est sans doute moins le signe d'invariances cognitives (9), que l'indice d'une communauté de pratiques, et notamment de pratiques scolaires : par exemple l'association répétée des manipulations de bougies et de petits organismes pour "montrer" le rôle de l'air dans la respiration et la combustion. En ce sens, le réseau conceptuel n'est certainement pas une donnée mais une **construction**... Une fois admis que pour "trouver" le sens que la chimie contemporaine attribue à une expérience de combustion et d'oxydation, il faut faire intervenir toute une série de présupposés qui ne sont pas toujours là (ou pas toujours articulés), une comparaison historique peut prendre un intérêt pédagogique. À condition de s'intéresser non à d'hypothétiques démarches standards de constitution des savoirs, mais aux conflits dont procèdent les connaissances contemporaines sur lesquelles "tout le monde" est d'accord, sauf justement ceux qui doivent les apprendre (10). Comme l'a souligné S. Pumfrey, nombre de ces pré-requis correspondent à des enjeux de **controverses** des XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles, et en particulier, dans le cas de la combustion et des oxydations, aux débats entre Lavoisier et Priestley, entre partisans du phlogistique et partisans de la chimie de l'oxygène (11). Avant de discuter cette correspondance, un rappel du récit classique est nécessaire.

les pré-requis du
sens de
l'expérience

2.2. Priestley, Lavoisier et la décision par le mercure

Ce qu'on pourrait appeler la querelle du phlogistique ou la controverse sur l'oxygène est moins un débat entre Priestley et Lavoisier qu'un processus qui dure une vingtaine d'années (1780-1800) et voit la constitution d'un nouveau corpus de représentation et de manipulation des corps chimiques et son acceptation par les communautés savantes (12). Pour approcher cette transformation, il faut partir de l'expansion de la "chimie pneumatique" à partir du milieu du XVIII^{ème} siècle. À la suite des travaux de Georg Stahl, de Stephen Hales ou de Joseph Black, les philosophes naturels multiplient les variantes de l'élément air et stabilisent les procédures permettant de les isoler : *air fixe* produit par effervescence de la craie en présence d'acide ; *air inflammable* par réaction de certains métaux sur l'acide vitriolique ; *air nitreux* par réaction du cuivre sur l'acide nitrique (13). C'est dans le contexte des multiples analyses sur la nature et les effets de substances qui deviendront des gaz, que Priestley s'intéresse à la calcination des métaux (14).

Pour Priestley comme pour Stahl, la calcination est identique à la combustion (15). Elle consiste en un transfert du principe du feu, le *phlogistique* qui passe du combustible ou du métal vers l'air. Une fois chargé en phlogistique, l'air courant devient de l'air fixable, soluble dans l'eau, troublant

la "chimie
pneumatique"

le phlogistique
explique la
combustion

l'eau de chaux. À l'image du charbon de bois ou de terre qui sont considérés comme des sources majeures de phlogistique et qui laissent des cendres après combustion en libérant de la fumée, les métaux sont des combinaisons qui perdent leur phlogistique lors du chauffage et deviennent des terres. L'opération inverse, la réduction des chaux, redonne du phlogistique en présence d'un corps ayant moins d'affinité que lui pour le principe du feu. Le phlogistique permet ainsi de comprendre les affinités entre airs, métaux et acides. Mais surtout, il est indispensable en pratique : les opérations des métallurgistes sont des références courantes des chimistes-savants et l'identité entre combustion et calcination est devenue un fait fondamental. À l'occasion, Priestley déplace le phlogistique de Stahl (16). Il en fait parfois un principe-substance, isolable et peut-être identique à l'*air inflammable* ou à une substance "calorique" invoquée pour rendre compte des transferts de chaleur. En dépit de ces variations théoriques, la principale ambition de Priestley reste expérimentale et pratique : accumuler des "faits" qui pourront être mis à la disposition de tous. Il est ainsi auteur de l'isolement et de la description d'une dizaine d'airs différents. En 1774-1775 par exemple, Priestley reprend certaines expériences de calcination d'une chaux mercurique désignée comme *mercurus calcinatus per se* (17). Par chauffage prolongé à l'aide d'une lentille de grande dimension, il en obtient un air qu'il considère comme nouveau et qu'il nomme *air déphlogistiqué* pour deux raisons : premièrement, cet air est produit par une réaction de fixation de phlogistique dans le mercure ; deuxièmement, il manifeste des comportements opposés à ceux de l'air issu des réactions de combustion : il ravive la flamme d'une chandelle et facilite la respiration de souris et de petits organismes.

la calcination
de la chaux
mercurique et
l'invention de
l'oxygène

Une réaction similaire est montée peu après par Lavoisier (18). Ce dernier commence par conclure que le chauffage du *mercurus calcinatus* ne produit que de l'air normal avant d'adopter l'idée de Priestley selon laquelle il s'agit d'un nouvel air "plus pur" que l'air. Lavoisier va plus loin. Plutôt que de s'intéresser comme Priestley aux autres sources d'*air déphlogistiqué*, il reprend l'étude de l'opération inverse, la calcination du mercure proprement dit, une réaction connue pour susciter un problème spécifique puisque la masse de chaux mercurique obtenue était, comme le pharmacien-chimiste Bayen venait de le confirmer, supérieure à celle du mercure initial, ce malgré la libération du phlogistique. Entre 1775 et 1776, Lavoisier combine à plusieurs reprises chauffage de la chaux et calcination du métal. Un des traits distinctifs de ces manipulations est, comme dans ses travaux antérieurs sur les eaux minérales ou la combustion du soufre et du phosphore, qu'il pèse systématiquement et effectue des bilans (19). Lavoisier combine les expériences pour constituer un "cycle" idéal de fixation et de libération de la "*partie la plus pure*" de l'air. Le gain de masse qui

accompagne la calcination est ainsi proclamé équivalent à la masse de l'air libéré lors de la réduction. Par là, il inverse la relation simple/complexe entre métaux et terres, suggère que le métal est simple, la chaux une combinaison de ce dernier avec une partie de l'air. Parallèlement, il indique que la dissolution du mercure dans l'acide nitrique produit de la chaux mercurique parce que l'acide est lui-même un composé contenant cette même "partie la plus pure" de l'air. Associées à une série d'autres déplacements, en particulier la poursuite des analogies entre combustion et respiration, entre calcination et acidification, ces recherches sur le mercure amènent Lavoisier à transformer cette "base" de l'air en "oxygène" élément fixé lors des calcinations, réagissant avec le soufre, le phosphore ou l'air nitreux pour produire les acides. À partir de 1777, il en fait une pièce décisive d'une théorie générale de la combustion qui associe trois composantes : l'oxygène fixé, la *mofette* qui compose l'air résiduel inerte, la matière du feu (plus tard, le *calorique*) qui est libérée et génère chaleur et lumière. L'oxygène est ainsi le produit de l'éclatement du phlogistique-matière du feu et d'un renversement de perspective qui remplace la libération d'un élément-principe par une réaction de fixation d'un gaz.

L'opposition entre Priestley et Lavoisier porte sur l'existence du phlogistique et la nature de cet air spécial. Au milieu des années 1780, la controverse se double d'un débat sur la composition de l'eau. Lavoisier prolonge les expériences du britannique Cavendish et organise en grand une de ses combinaisons de décomposition/recomposition pour montrer que l'eau n'est pas une substance simple mais un composé "poids pour poids" d'air inflammable et d'air déphlogistiqué. Cela lui permet d'expliquer pourquoi la réaction d'un acide et d'un métal peut libérer de l'air inflammable, phénomène jusque-là étranger à une théorie qui voyait dans les métaux des éléments simples et dans les acides des composés d'oxygène et de terres. Le caractère spectaculaire de la démonstration aide à rallier les chimistes-physiciens français (Claude Louis Berthollet, Louis Bernard Guyton de Morveau, Gaspard Monge, François Fourcroy) à la "nouvelle chimie". À l'opposé, la controverse entre chimistes français et pneumaticiens britanniques se poursuit jusqu'à la disparition des deux principaux protagonistes : Priestley meurt en exil aux États-Unis en 1804 alors que Lavoisier est guillotiné en 1794.

Face aux récits du bon et du mauvais larron, les historien(ne)s soulignent généralement que le débat ne portait pas tant sur les résultats des expériences que sur les épistémologies qui déterminaient la nature des preuves acceptables. Une dissymétrie fréquente dans les récits vulgarisés consiste par exemple à présenter les expériences de Lavoisier puis à indiquer que Priestley avait bien observé la décomposition de la chaux mercurique ou celle de l'eau mais qu'il n'a jamais réussi à interpréter ces faits. La situation est évidemment beaucoup plus complexe. Priestley a

la conviction par
la composition
de l'eau

l'opposition de
deux cultures
scientifiques

dans son arsenal une série d'interprétations faisant appel au phlogistique et un corpus expérimental qu'il peut opposer à celui de Lavoisier. Le conflit de résultats serait donc le produit de philosophies de la nature incompatibles. Là où Lavoisier privilégie l'existence d'une loi divine illustrée par le modèle géométrique, Priestley vise l'économie de la nature et sa "bonté". Le phlogistique participe ainsi d'un cycle de transformations de l'air et d'une histoire du monde. La "bonté de l'air", son caractère respirable, sont continuellement viciés par la respiration des hommes et des animaux. Les provisions de Dieu pour l'homme consistent à faire intervenir des événements et processus qui restituent les qualités de l'air. Priestley les a mises en évidence dans quelques expériences simples mais spectaculaires : la dissolution de l'air fixe dans l'eau par agitation mécanique qui mime le travail des océans ou la production d'air déphlogistiqué par les plantes.

2.3. Le constructivisme entre pédagogie et histoire

contextualiser la
notion
d'expérience
cruciale

Paradoxalement, c'est précisément parce que la querelle ne procède pas de la confrontation à quelques expériences cruciales mais d'un conflit entre différentes cultures et pratiques scientifiques que les parentés avec les représentations des adolescents ont pu être exploitées. Stephen Pumfrey et ses collègues ont en particulier utilisé la controverse Priestley/Lavoisier pour proposer une contextualisation de la notion d'expérience cruciale. Dans ce cadre, le jeu d'analogies qui intervient dans le débat sur la nature de la calcination est tenu pour similaire à celui que les élèves dérivent de leur expérience sensible : par exemple, les rapprochements entre réaction des métaux et respiration. D'où une apparence de répétition. Comme les tenants du phlogistique, les adolescents contemporains mobiliseraient des entités sans masse, le concept de perte de substance au cours du chauffage, l'idée d'un empoisonnement de l'air. L'intérêt pour le précédent historique tient à la prise en compte d'un conflit de représentation et d'intérêt. Si une expérience a un caractère "crucial", c'est moins parce qu'elle est une preuve décisive que parce qu'elle cristallise un conflit latent. En conséquence, plutôt que d'utiliser une imagerie d'Épinal attribuant à Lavoisier toute la modernité et la scientificité, à savoir l'utilisation du principe de conservation de la matière, l'art de la mesure précise, la maîtrise du calcul et une définition pragmatique de l'élément pour expliquer sa victoire sur un Priestley religieux, qualitatif et sans esprit de système, l'enseignant(e) devrait faire intervenir une histoire un peu plus équilibrée, utiliser la controverse en tant que telle dans le cadre d'une **réplication pédagogique**.

Là où la psychogénèse rejoignait l'histoire pour permettre la (re)connaissance des objectifs-obstacles, la continuité culturelle de longue durée fonde la réplication pédagogique.

les analogies
entre controverse
historique et
conflit socio-
cognitif

À l'arrière-plan, il n'y a pas un déterminisme de l'évolution cognitive, mais seulement une isomorphie basée sur le maniement d'outils et de dispositifs parents. Les analogies sont éloquentes non pas tant parce que les élèves retrouveraient le "mode de pensée" de Priestley et des partisans du phlogistique mais parce qu'elles font intervenir des stratégies et ressources analogues à celles de Priestley et de Lavoisier lorsque ces derniers agissent en "philosophes naturels" et mobilisent des expériences sensibles et des opérations utilitaires qui font encore partie de notre culture. Il est important de voir que cet "être encore là" n'est pas de l'ordre de la nature mais de l'expérience collective. La combinatoire qui fait jouer simultanément calcination, respiration et combustion est bâtie sur la centralité du rôle du feu et de la chaleur. Pour les savants-chimistes d'Ancien Régime, elle s'inscrit dans un réseau de pratiques fondatrices d'un "mode de vie" scientifique qui comprenait les éléments-principes, la mesure des volumes, la réduction métallurgique des minerais, la médecine des humeurs, aussi bien que les tests de l'oiseau ou du candélabre qui établissaient le lien entre les caractères "air non respirable" et "air impropre à la combustion". L'argument du constructivisme historique consiste alors à estimer que cette forme de vie n'existe évidemment plus (ne serait-ce qu'à cause des conséquences de la Révolution Chimique), mais qu'elle constitue un des mondes possibles, lequel a laissé des traces qui peuvent nourrir les controverses contemporaines. La métallurgie et les physiocrates sont certes, hors de portée de la plupart des adolescents mais la bougie sous une cloche ou la balance sont toujours là. Expérience quotidienne et expérience scolaire se relaient pour constituer des systèmes de représentations conflictuels.

la réplique de
l'expérience
historique ment

Tout le problème des analogies entre l'expérience des philosophes naturels et celle de nos élèves est toutefois qu'elles mentent par où elles sont suggestives. Elles mentent à l'historien(ne) parce qu'elles reposent sur des opérations de traduction, de sélection et de décontextualisation. Ainsi, la mise en place (historienne ou pédagogique) de l'expérience sur le mercure donne une importance majeure à la question du gain de masse lors de la calcination des métaux. De même, on fait sans hésitation, de l'*air fixe*, un dioxyde de carbone, ou pire, de l'*air déphlogistiqué*, de l'oxygène alors que ce dernier n'est pendant longtemps qu'une définition opérationnelle associant production par réduction des chaux métalliques, et qualités sensibles qui en font la "partie la plus pure" de l'air. Le jeu des analogies ment aussi parce qu'il entraîne le chimiste-enseignant dans une historicité dont il ne sait pas quoi faire sauf à en sortir. Que faire des remarques de Priestley selon lesquelles Lavoisier n'a fait qu'un tout petit nombre d'expériences ou pire selon lesquelles ses calculs destinés à corriger les incertitudes de la manipulation contredisent la méthode expérimentale ? Que faire des expériences de décomposition de l'eau à grande

échelle menées par Lavoisier devant les envoyés de l'Académie et du Roi de France ? Évaluer l'intérêt d'une exploitation de la controverse historique en situation scolaire revient donc à juger de la pertinence de l'utilisation de mêmes mots et énoncés pour désigner des situations que l'essentiel sépare : deux siècles, les matériaux utilisés, les acteurs et les finalités sociales. Il existe bien des points communs entre le jeu que nous jouons aujourd'hui avec "les airs" et celui que jouaient Lavoisier et Priestley mais ils ne suffisent pas à garantir *a priori* de la fécondité des transferts et de l'intérêt des analogies. De même qu'il est inutile de tenter de rejouer la prise de la Bastille pour comprendre la Révolution, il faudrait donc abandonner l'idée d'un lien entre notre construction de l'oxydation du mercure et Lavoisier.

Lavoisier et
Priestley dans
les manuels
britanniques

Pour échapper à l'impasse du débat théorique général, un examen des usages scolaires de la querelle du phlogistique est sans doute un détour fructueux. On en prendra deux exemples extrêmes : les manuels existant pour la préparation du GCSE (20) et la séquence proposée par Pumfrey et ses collaborateurs. Contrairement aux recommandations du nouveau *National Curriculum*, l'introduction de Priestley et Lavoisier dans les textes préparant au GCSE est très proche de nos timides utilisations de l'histoire de la chimie : conçues pour aider à assimiler le concept de réaction avec l'oxygène (21). Les matériaux historiques consistent généralement en textes (tableau des éléments du traité de 1789) et images (gravure de Lavoisier) sans lien avec les manipulations effectuées avec les élèves : le plus souvent des expériences sur le rôle de l'air (bougie et/ou souris sous une cloche) et la combustion (bois ou papier) ; parfois la réaction de calcination du cuivre est présentée avec une discussion de l'augmentation de masse et de la diminution de volume. Le schéma d'explication historique est remarquablement stable et conforme à l'idéal-type de découverte progressive et d'expérience cruciale (22). On commence par une description de la théorie du phlogistique mentionnant son lien à l'expérience naturelle de combustion (phlogistique et fumée ; chaux et cendres). On aborde ensuite la mise en évidence par Priestley d'un gaz nouveau à partir de la chaux mercurique et on passe aux expériences d'oxydation et de réduction du mercure par Lavoisier, présentées cette fois dans leur dimension quantitative (volumes de gaz consommés et restaurés) ce qui permet de présenter à la fois le gain de masse et la composition de l'air atmosphérique.

valeur
didactique de
cette présence ?

Qu'en est-il de la valeur didactique si ce n'est historique ? L'enjeu est de faciliter la compréhension d'un faisceau de notions qui comportent la réaction entre gaz et solide, la fixation d'oxygène dans les oxydations, la réversibilité oxydation/réduction, les rapports substance composée/élément et ainsi de préparer le terrain pour les développements sur la structure atomique, la table périodique, puis les couples redox, l'électrolyse et les réactions électrochimiques. En

l'absence d'analyse spécifique, il est difficile de spéculer sur les effets de la référence à Lavoisier et Priestley. On peut toutefois estimer que celle-ci n'a pas un statut différent d'un texte introductif ou d'un exercice d'application puisque la seule mention de quelques noms et dates ne peut donner corps au passé. On conclura donc au caractère **contingent** du choix entre divers modes d'illustration d'un cours, par exemple du choix entre des matériaux historiques et des illustrations tirées de la vie quotidienne contemporaine (comme les batteries et piles pour l'électrochimie).

La séquence intitulée "*The battle over burning*" proposée par S. Pumfrey et ses collègues est d'une tout autre nature (23). Il s'agit d'un ensemble intégré où la controverse Priestley/Lavoisier est le cœur d'un dispositif qui combine plusieurs ingrédients d'une pédagogie de "découverte" : depuis la recherche documentaire à la réalisation de manipulations semblables à celles de Priestley, en passant par la production d'interprétations et d'hypothèses concurrentes au sein du groupe classe. Pour autant la cohérence n'est pas d'ordre historique : l'enjeu est bien de faciliter l'assimilation de notre chimie en utilisant les analogies et représentations spontanées. En conséquence, même si les matériaux fournis par l'historien sont nombreux, la logique d'organisation procède d'une mise en scène (et en perspective) de l'expérience cruciale. On part donc de l'expérience sensible de la combustion pour attribuer une valeur à la théorie du *phlogiston*. On aborde ensuite les acquis de Priestley et de la chimie pneumatique à travers la manipulation des différentes sortes d'air en privilégiant les classifications descriptives (effets qualitatifs simples). Une fois le rééquilibrage en faveur de Priestley (et des représentations spontanées) effectué, la séquence vise à construire la situation de conflit en mettant en scène l'anomalie de masse des réactions de calcination. L'ouverture d'une controverse interne au groupe pose immédiatement la question des conditions de clôture : jusqu'où faut-il pousser la présentation et l'utilisation des arguments des "phlogistiques" ?

Ici, la priorité est à la production d'un conflit cognitif limité où l'ingénierie enseignante guide le groupe vers la reconnaissance de l'importance des changements de masse comme synonyme des déplacements de matière (y compris pour les substances gazeuses). D'où la prise de conscience de la faiblesse des explications attribuées aux phlogistiques : une matière sans masse ou, pire, avec une masse négative. Une fois canalisée dans cette voie, la séquence peut se poursuivre avec notre héritage : les autres expérimentations, en particulier la présentation d'une réplique audio-visuelle de l'expérience avec le mercure, viennent illustrer l'apport de Lavoisier pour aboutir à la nouvelle nomenclature en laissant de côté les réponses de Priestley qui deviennent beaucoup trop complexes. Dans son évaluation, S. Pumfrey soulignait que cette séquence laissait très peu de partisans du phlogistique tout en clarifiant une par-

la réplique
pour contourner
le conflit socio-
cognitif

évaluation de la
séquence
pédagogique

tie des confusions et ambiguïtés sur la nature et le rôle de l'oxygène. Il reste que pour l'historien, l'organisation pédagogique visant l'enseignement de la chimie entre en conflit avec deux points de méthode : le traitement équilibré des différents acteurs et la non-téléologie du récit. L'orientation de la séquence (il faut arriver à notre chimie en perdant un peu de temps mais pas trop) pousse la "reconstruction" dans le sens d'une pédagogie de l'expérience preuve et d'une mise en scène classique (Priestley disparaît lorsque Lavoisier se saisit de la chaux mercurique).

Cet argument d'efficacité du détour par la controverse Lavoisier-Priestley pose la question de savoir s'il faut plaider pour une véritable attention à la matière des historien(ne)s et en fonction de quels objectifs ? Une réponse positive peut être justifiée par deux motifs. D'une part, la recherche d'une pratique pluridisciplinaire restituant toute son importance à un contexte conçu non pas comme un "milieu" mais comme une part intrinsèque de ce qui fait une culture scientifique. D'autre part, la volonté de donner un sens à la pratique de la science, en particulier aux savoir-faire et manipulations matérielles. Pour évaluer l'intérêt d'une réplication pédagogique, il faut toutefois revenir sur ce que l'historiographie récente nous a appris de la controverse entre Lavoisier et Priestley.

3. DU PHLOGISTIQUE, DE L'OXYGÈNE ET DES SAVANTS D'ANCIEN RÉGIME

Un survol de l'abondante littérature consacrée à Lavoisier et à la Révolution Chimique suggère qu'il y a eu une forte continuité des problématiques jusqu'à la fin des années soixante-dix, suivie d'une évolution rapide des questions et des objets (24). Nombre des interrogations à l'origine des travaux consacrés à Lavoisier portaient sur les continuités et ruptures conceptuelles, sur le quand et comment était intervenu l'abandon du système de Stahl et du phlogistique, sur l'émergence d'une chimie fondée sur la gravimétrie et la recherche des lois de composition entre éléments, sur les formulations successives des théories de la combustion et des oxydations. L'image fournie par ces analyses était celle qui a été résumée plus haut avec une révolution disciplinaire en deux moments. D'abord, une phase de multiplication des "faits" sur la réactivité chimique et les gaz, dominée par les pneumaticiens britanniques, nourrie par l'introduction de nouvelles techniques dans le cadre d'une philosophie qualitative encore attachée à la description des qualités sensibles et des rapports entre principes. Ensuite, une phase de réorganisation initiée par Lavoisier et les chimistes français qui construisent un système cohérent de composition des éléments à partir d'une nouvelle attention à la mesure précise et à quelques expériences princeps, en parti-

des
pneumaticiens
britanniques...

aux chimistes
français

culier en matière de réactivité de l'oxygène. Du fait de l'émergence d'une histoire des sciences à vocation plus sociale et culturelle, le tableau s'est diversifié.

3.1. Cahiers de laboratoire et gestion de l'incertitude

Du côté des raffinements, on mentionnera quelques apports de l'examen des registres de laboratoire de Lavoisier qui, paradoxalement, a contribué à fixer l'image d'un Lavoisier beaucoup plus "politique" dans son mode d'administration de la preuve (25). On en prendra pour indice, les premières expériences sur l'*air déphlogistiqué* (26). La tradition veut que Lavoisier ait appris en octobre 1774 par une visite de Priestley à Paris que l'on pouvait produire de l'air par chauffage de la chaux mercurique et qu'il ait ensuite répété plusieurs fois l'opération jusqu'à conclure dans le courant de 1775 que cet air était "*la partie et la plus pure et la plus respirable de l'air commun*". La confrontation des comptes rendus publics et des registres montre d'abord l'étendue du travail d'écriture et de reconstitution des événements présidant à la publication. Ainsi la version "finale" de 1775, souvent lue comme un des premiers signes de la constitution d'une théorie de la combustion puisque Lavoisier y indiquait que l'augmentation de masse observée lors de la calcination des métaux était due à la fixation de la partie "pure" de l'air, correspond à l'agglomération d'interprétations successives et contradictoires qui ne se démarquent pas de la chimie du phlogistique. Lavoisier considérait ainsi que l'air obtenu à partir de la chaux mercurique pouvait être **en même temps de l'air commun et quelque chose de plus pur, que l'air fixe correspondait à un air enrichi en phlogistique**. Plus, Lavoisier n'abordait l'idée d'un nouvel air qu'à la suite de Priestley, au début de 1776, après une réévaluation de ses propres résultats.

Le plus intéressant de l'épisode n'est pas dans l'attribution à Priestley ou Lavoisier de la "découverte" de l'oxygène mais dans ce qu'il nous apprend sur les pratiques expérimentales et la gestion de l'incertitude. L'analyse de l'air obtenu à partir de la chaux mercurique s'appuie sur une série de procédures de mise en évidence des propriétés des différents airs : comportement vis-à-vis de l'eau de chaux, respirabilité par les animaux, possibilité d'y faire brûler une bougie. Une réaction est d'importance : le test à l'air nitreux mis au point en 1772 par Priestley pour mesurer la qualité et la respirabilité de l'air (27). La réaction consistait à mélanger un volume d'air nitreux (obtenu par réaction d'un métal sur l'acide nitrique) à deux volumes de l'air à tester au-dessus d'une cuve à eau. La production de vapeurs rouges était suivie d'une spectaculaire diminution de volume (un air "dévorant" l'autre). Le phénomène était considéré par Priestley comme dû à la décomposition de l'air nitreux en phlogiston et base (liquide) de l'acide nitrique, réaction accompagnée

par une solubilisation d'une partie de l'air commun phlogistique. Avec l'air atmosphérique, la diminution du volume initial était d'environ 1/5 du volume d'air nitreux ajouté, mais avec les airs viciés par les combustions ou la respiration, elle variait en raison inverse de la richesse en phlogistique et/ou de la richesse en *air fixe*. Ainsi, de petites différences de qualité de l'air pouvaient être quantifiées par les variations de volume. En 1775, Lavoisier s'inquiète de la nature de l'air issu de la chaux mercurique, il fait appel au test de Priestley qu'un collaborateur de ce dernier lui a appris à manier et il trouve une diminution identique à celle de l'air atmosphérique.

le choix de
l'expérimentation

Cette indication s'oppose aux observations qualitatives de Lavoisier (intensité des vapeurs, vigueur de la combustion d'une bougie) mais elle va dans le même sens que les calculs. L'évaluation de l'expérience est, pour Lavoisier, un problème de reconstruction rationnelle qui justifie la correction des aléas de l'expérimentation. Effectuant une série de pesées pour déterminer la quantité de chaux mercurique et celle du mercure obtenu en fin de réaction, Lavoisier calcule la perte de masse et la compare au volume d'air finalement recueilli pour obtenir une indication sur la densité de l'air produit. Pour cela, il faut faire des choix et estimer certains des paramètres et des circonstances qui font l'imprévisibilité et l'unicité de l'expérience : le volume d'air atmosphérique initialement présent dans le dispositif, la quantité de mercure perdue dans le col du matras et non pesée, la quantité de sable mêlée au mercure final du fait d'une fusion partielle du verre... La conclusion selon laquelle l'air dégagé a une densité analogue à celle de l'air atmosphérique, est donc un produit hautement élaboré qui doit sa légitimité au caractère plausible du récit sur les sources d'erreur et au caractère raisonnable, si ce n'est attendu, du résultat finalement adopté. La mesure est donc affaire de conviction et de hiérarchisation des dispositifs et des informations, fonction des engagements collectifs.

le consensus,
en pratique

Peu après ce travail de Lavoisier, Priestley change d'avis et indique d'autres résultats sur la "bonté" de cet air, en particulier le fait qu'au cours du test à l'air nitreux, la diminution de volume est bien supérieure à celle de l'air commun. Le nouvel air devient un *air déphlogistique* car il est meilleur que l'air courant vicié par le phlogistique, car sa production apporte du phlogistique à une chaux. Bref, Lavoisier qui le trouve analogue à l'air commun n'a pas su réaliser le test à l'air nitreux. Résultat local contre résultat local, témoignage contre témoignage, la controverse pourrait durer jusqu'à ce que les protagonistes se mettent d'accord sur toutes les circonstances et matériaux, jusqu'à ce qu'ils fassent tout en commun. Mais Lavoisier fait confiance à l'inventeur du test, refait les observations et réussit à obtenir la diminution de Priestley (28). L'opération est complétée quelques semaines plus tard par la juxtaposition de deux manipulations qui fournissent la trame de l'argument de décompo-

sition/recomposition : la diminution de 1/6 de volume de l'air atmosphérique lors de la calcination du mercure et la transformation de l'air ainsi diminué en air propice à la combustion par addition d'*air déphlogistiqué*. L'établissement du résultat expérimental est donc une question de consensus pratique autant que d'innovation conceptuelle.

L'intérêt pour les détails des cahiers de laboratoire montre aussi où le parcours historique se sépare de la reconstruction en termes d'expérience cruciale et de sa traduction pédagogique : les expériences de Priestley et Lavoisier ne sont pas comparables et les manipulations de la chaux mercurique ne produisent pas l'oxygène (29). Du fait de la flexibilité des analogies et schémas utilisés par Lavoisier, l'expérience avec la chaux mercurique pouvait donc aussi bien libérer de l'*air fixe* que de l'air commun (30). Le débat avec Priestley sur la chaux mercurique fait certes pencher la balance en faveur de la deuxième interprétation, mais comme l'a souligné F. Holmes, la reconfiguration de la théorie de la combustion intervient plus tard, lorsque Lavoisier reprend la question des rapports avec la respiration et en particulier le problème de la genèse de l'*air fixe* (31).

3.2. Lumières ou Bonté Divine, loi naturelle ou savoir-faire

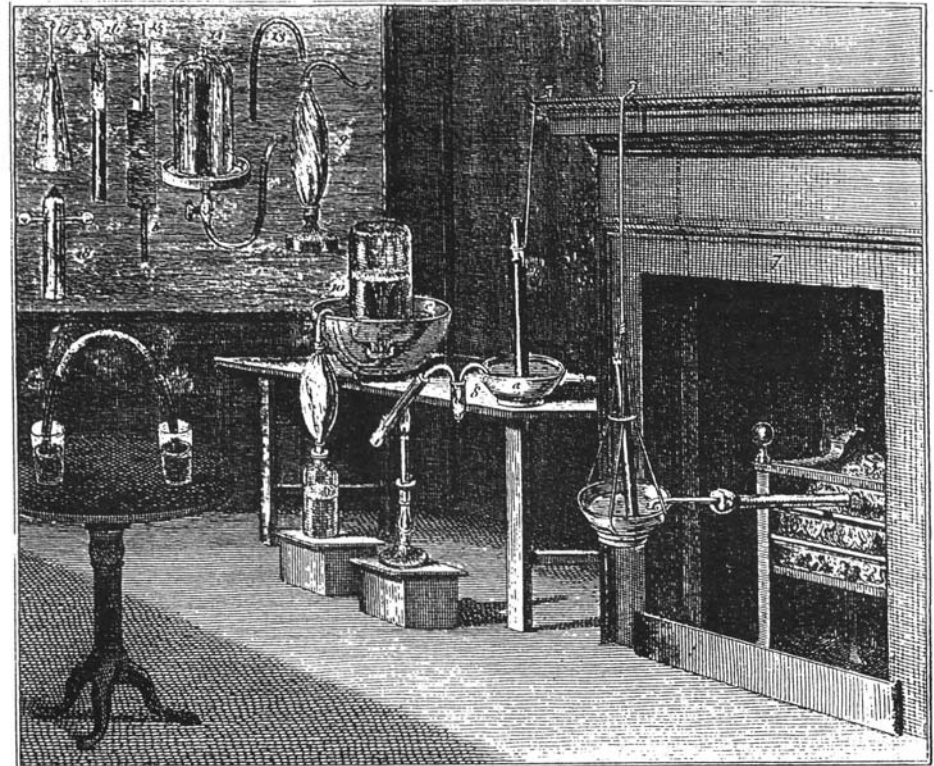
Avec l'intérêt renouvelé pour des objets comme les rapports entre science et culture des Lumières, comme la rhétorique de la preuve ou les savoir-faire techniques, émerge une symétrie de traitement des protagonistes qui rompt avec l'opposition entre un Priestley théologien et politique et un Lavoisier savant. Il semble qu'on soit en passe de retrouver les articulations entre les différentes sphères d'action des savants d'Ancien Régime, ce qui fait que les philosophes naturels ne sont pas des *chimistes* ou des *chercheurs* (32). Priestley retrouve ainsi son activité d'expérimentateur et d'inventeur et Lavoisier son rang de titulaire d'office, d'administrateur, de propriétaire terrien. On en prendra pour indices deux exemples qui permettent de comprendre la non séparation entre l'expérimentation et les formes de vie dans lesquelles Priestley et Lavoisier déploient leur activité : d'une part, la question de l'utilité et du rapport à l'Etat ; d'autre part, celle de la précision et de la quantification.

Le problème de l'utilité de la chimie pneumatique est un enjeu décisif de la seconde moitié du XVIII^e siècle dans la mesure où la physique qui s'occupe de la chaleur, de l'électricité, du magnétisme ou des substances chimiques tend alors à passer d'une exploration du "curieux" à celle de "l'utile" (33). Priestley poursuit un travail qui vise à la production de **faits** qui pourront être vus, évalués, reproduits et utilisés par "*tous les hommes de bonne foi*" (34). La légitimation par l'aspect spectaculaire ou surprenant des phénomènes, qui dominait la première moitié du siècle, ne disparaît pas, mais il s'y ajoute une dimension utilitaire qui

de nouveaux
objets d'histoire

l'utilité de la
chimie
pneumatique

suppose non seulement la reproductibilité des expériences par les conférenciers itinérants dans les lieux d'éducation du public, mais aussi une circulation et une évaluation par la multiplication des usages locaux, par la transformation des phénomènes en biens et marchandises (35). Ainsi la question des connaissances sur les différentes sortes d'airs est un problème pratique de définition de leurs propriétés, d'évaluation de leur "valeur". Les procédures expérimentales de Priestley sont par exemple étroitement liées à la mise au point de deux innovations médicales et commerciales. La première est la mise à la disposition du public d'une technique de gazéification de l'eau en y faisant barboter l'*air fixe* produit à partir d'un mélange de craie et d'acide (Figure 1) (36). Priestley en est d'autant plus satisfait que des médecins aussi réputés que Pringle (alors Président de la Royal Society) ou Mac Bride (le chirurgien de la marine royale) ont fait du traitement par l'eau carbonatée un instrument de lutte contre les gangrènes et purulences.



Joseph Priestley, *Experiments and observations on different kinds of air*, 1775
(note 5, vol. 1, opp. last page).

Figure 1
J. Priestley (1775). Instruments d'expériences sur les différentes sortes d'air.

Priestley mesure
la bonté de l'air

La seconde innovation est le test à l'air nitreux déjà évoqué où la diminution de volume produite par réaction de l'air nitreux avec le gaz à tester permet d'évaluer la pauvreté de ce dernier en phlogistique et donc son caractère propre à la respiration (37). Le test est bon car il est d'emploi simple, et aucun observateur n'en a contesté la faisabilité. Priestley lui doit sa médaille Copley accordée par la Royal Society et il est le point de départ de toute une lignée d'appareillages et d'investigations sur les bons et mauvais airs, leur géographie, leur influence sur la distribution des miasmes et pestilences (38). Cependant, le problème n'est pas qu'une question de clientèle médicale, la valeur de l'air est aussi une question de vertu morale : le bon air est signe de bonté et de bienveillance de la nature (39). L'utilité est à la fois un objectif de la pratique expérimentale (tournée vers la satisfaction des besoins humains, le phénomène intéressant et vrai doit être perceptible par tous, manipulable et transportable grâce à la description détaillée des circonstances) et une qualité théologique (la nature a été faite bonne et bienveillante par un Dieu qui veut le souverain Bien, elle est uniforme car résultat de l'action continue d'un Dieu qui est la source des pouvoirs) (40). De fait, Priestley tente de comprendre comment l'air atmosphérique, *vicié* par les fermentations et putréfactions peut redevenir bon (41). L'*air déphlogistiqué* est l'une des extrémités d'une chaîne continue allant du plus respirable au moins respirable (de l'*air déphlogistiqué* à l'*air inflammable*), du plus riche au moins riche en phlogistique. Comme les autres, il est susceptible d'indications thérapeutiques (42).

L'univers de Lavoisier est d'un autre ordre. Non que l'utilité en soit absente, mais elle a pris un autre sens pour les physiciens français des Lumières. Elle ne passe plus par le spectacle (public) d'une nature abordée comme un ensemble organique, laissant place aux provisions de Dieu pour l'homme. Elle suppose l'organisation d'un espace (clos) où l'on peut mettre en évidence la loi en maîtrisant les phénomènes et leurs variations : le laboratoire. Ce dernier est lié à la production des biens utiles, par le biais de la connaissance des règles universelles d'évolution de la matière. L'utilité n'est plus spontanée et donnée à voir, c'est le résultat d'une mise en ordre (43). Pour Lavoisier, la simplicité ou la transportabilité des manipulations ne sont pas des qualités en soi. Elles ne priment pas sur ces valeurs essentielles que sont la précision et la quantification. L'expérience n'est pas une description de faits ou de phénomènes ; elle suppose une machinerie complexe qui permette de neutraliser la diversité et la variabilité des conditions, de maîtriser les "circonstances" à travers la construction d'un espace "professionnel" où agissent les maîtres du calcul et de l'interprétation. Le savant sera donc un homme utile non parce qu'il accumule des "savoir-faire" mais parce qu'il dispose de "savoir" qu'il gère en auxiliaire de l'État qui seul dis-

pose de la puissance d'organisation (44). La production de l'utile passe donc par la commande et le rapport d'expertise.

La question de la production du salpêtre et de l'organisation de la Régie des Poudres dont Lavoisier devient administrateur en 1775 illustre cette configuration. Lavoisier est considéré comme le principal artisan de la transformation de la production de poudre en un point fort de l'administration royale et une des sources du renouveau de la puissance militaire française. En 1785, dix ans après sa création par Turgot, la nouvelle régie couvre les besoins du pays et exporte l'un des meilleurs produits d'Europe (45). Malgré les tentatives de Lavoisier pour implanter des "nitrières" artificielles qui permettraient de s'affranchir de la recherche laborieuse du salpêtre naturel, l'essentiel de la transformation repose sur la découverte de nouveaux sites de formation du salpêtre, sur l'amélioration des circuits de collecte et de gestion.

Lorsque Lavoisier prend ses fonctions, Turgot fait mettre la question de la production du "nitre" au concours par l'Académie Royale et la commission chargée d'évaluer les mémoires et de reproduire les expériences devient une sorte de collectif de recherche dirigé par Lavoisier, travaillant dans le nouveau laboratoire de l' Arsenal où ce dernier a déménagé (46). Le mémoire sur la composition de l'acide nitrique présenté devant l'Académie au printemps 1776 lie production du nitre et étude de la combustion. On sait alors que le salpêtre est un sel qu'on peut aussi obtenir par réaction d'*alkali de potasse* et d'*esprit de nitre* (47). Une production artificielle pourrait être imaginée à partir de la connaissance de la nature de l'acide. Du moins, c'est l'espoir que laisse entrevoir Lavoisier. Dans les instructions accompagnant la question de l'Académie sur la production de nitre, il a ainsi fait figurer le problème du rôle de l'air dans la genèse du salpêtre. Plus, son mémoire sur la composition de l'acide nitreux et l'*air déphlogistiqué* paraît, avant les résultats du concours, dans une nouvelle série publiée par la Régie des Poudres (48). Les rapports entre la découverte de l'oxygène et la poudre à canon ne sont pas qu'une affaire de stimuli ou même d'organisation du laboratoire à partir des moyens rassemblés à l' Arsenal. Le lien établi par Lavoisier entre le sort du royaume, la poudre et les études sur la calcination est convaincant parce qu'il s'appuie sur les expériences sur la combustion du nitre et sur le rôle des gaz dans la détonation de la poudre (49). Le mémoire sur la calcination de 1775 se termine ainsi par une interprétation de la détonation bâtie sur l'idée d'une libération brutale de l'air accumulé dans le nitre (50).

La polarité entre une utilité "pragmatiste" fondée sur la multiplication des essais et des erreurs pour constituer des **faits**, et une utilité "rationaliste" reposant sur la constitution d'un corpus théorique à valeur universelle visant à produire des **applications du savoir**, correspond à deux modes

d'administration de la preuve. Chez Priestley, la genèse du consensus passe par une rhétorique de l'égalité et de l'accès immédiat au phénomène. Pour lui, il doit y avoir démocratie dans le jugement de la nature comme il y a démocratie dans le jugement des Écritures : c'est une affaire individuelle où la vérité tient de la conviction personnelle soutenue par la puissance de la Révélation ou de l'Évidence. Lavoisier est l'illustration d'une figure de savant "professionnel" pour qui la Nature doit être construite et qui s'adresse à une communauté de praticiens dont la qualification ne peut plus se limiter à être "dignes de foi" mais doit inclure l'habitude de l'activité de laboratoire, la maîtrise du calcul et du jugement comptable (51).

La question des instruments et des pratiques de répliation prolonge ce contraste. Priestley condamne les manipulations de Lavoisier parce qu'elles reposent sur un appareillage complexe, coûteux et qui ne peut pas être reproduit facilement (52). De fait, malgré la similitude des instruments utilisés dans les expériences sur l'*air déphlogistiqué*, Priestley et Lavoisier présentent leur laboratoire de façon très différente (figures 1 et 2). L'un décrit un lieu de vie où les instruments sont inscrits dans un décor quotidien qui rappelle l'espace public de présentation des phénomènes merveilleux de la science. La série d'instruments n'est pas très différente de celle décrite par Hales vingt ans plus tôt, si ce n'est l'introduction de la cuve à mercure. Sans intervention mécanique, les instruments de Priestley suggèrent une pratique manuelle de transfert des airs qui est complétée par l'observation des effets visibles. Seul indice de la mesure, les graduations de repérage des volumes. A l'opposé, Lavoisier présente des appareils hors contexte, destinés à une expérience unique ou à un seul type de manipulation car ils comportent une série de dispositifs (mécaniques ou pneumatiques) visant à supprimer l'intervention humaine (la pompe à air pour remplacer la succion) ou à neutraliser les paramètres indésirables (le thermomètre et le baromètre pour évaluer les variations de pression et de température lors des expérimentations sur les volumes). Ainsi l'allure des vases qui servent aux expériences de synthèse de l'eau a peu à voir avec le bricolage de Priestley. Plus, Lavoisier fait construire une série d'instruments, qui, tels les balances de précision et les gazomètres des expériences sur la synthèse de l'eau (figure 3), contribueront à rendre ses expériences uniques, non reproductibles par des individus moins fortunés.

les instruments :
machines ou
outils d'artisans

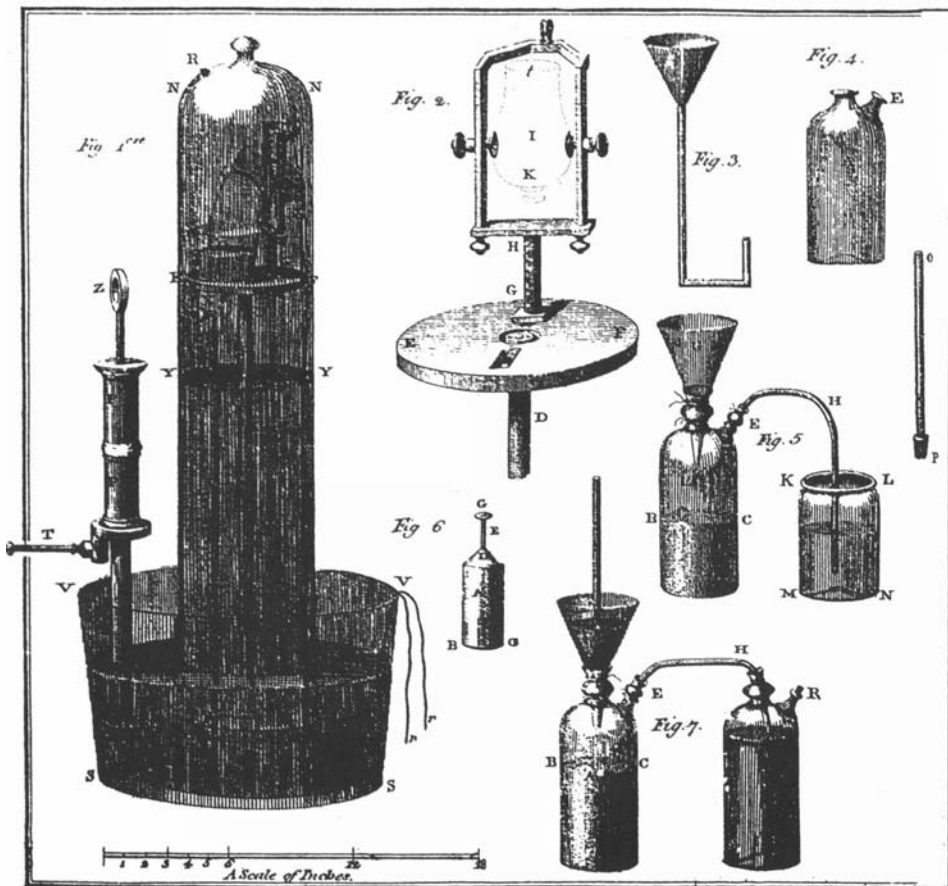


Figure 2
A. de Lavoisier (1774). Instruments d'expériences sur l'air fixe.

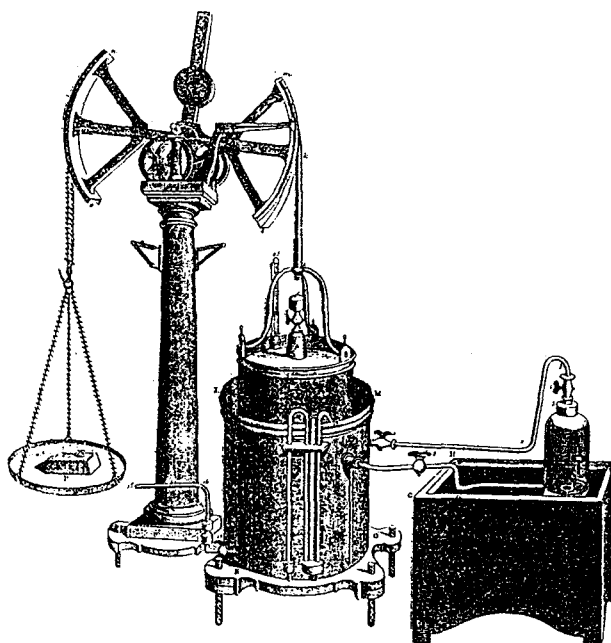


Figure 3

A. de Lavoisier (1789). Gazomètre à caisson des expériences sur la composition de l'eau.

savoir-faire et
rang social

Le statut social des deux hommes a évidemment sa part dans la constitution de ces styles d'opérations : Lavoisier est fermier général et dispose de l'Arsenal de la Régie des Poudres ; Priestley est tour à tour pasteur, précepteur et philosophe dépendant du patronage de groupes religieux radicaux. Mais la différence est aussi affaire de cultures locales. La réplication et la possibilité de circulation des pratiques est une affaire de première importance dans le contexte anglais alors qu'elle est marginale en France. Priestley s'étonne ainsi que Lavoisier puisse publier et surtout généraliser à partir des résultats d'un tout petit nombre d'expériences (et parfois même d'une seule) (53). L'accent mis sur la réplication le conduit à tenir l'expérience pour un **événement** qu'il faut transformer en **fait** en levant les obstacles à la circulation du faire au sein de la communauté des hommes de bien : les comptes rendus sont agencés selon une succession chronologique (ce que Priestley appelle l'ordre historique) ; ils comportent un luxe de détails pour décrire la totalité des circonstances qui pourraient se révéler importantes ailleurs. L'enjeu est la constitution d'un bien qui puisse servir et circuler (54). Dans le contexte français, Lavoisier choisit un autre mode d'explication, celui de l'ordre universel et de la loi attendue (55). Ce qui fait sens dans la comparaison et la répétition des expériences n'est pas la reproduction des mesures mais leur progression :

Lavoisier se rapproche des proportions simples et des rapports constants qu'il attend et qui reflètent par exemple la composition de l'acide nitrique ou celle de l'eau.

Des registres de constitution de la preuve propres à Priestley et Lavoisier alimentent l'opposition des pratiques. Le monopole de la mesure, de l'usage de la balance et de la loi de conservation des masses semble être une spécificité de Lavoisier. On peut ainsi décrire la querelle du phlogistique comme le conflit entre une physique du quantitatif et de la précision et une physique du qualitatif qui recoupe la montée en puissance de l'intérêt pour la mesure précise et pour la quantification qui vaut pour l'ensemble de la philosophie naturelle au XVIII^{ème} siècle (56). Pourtant, Priestley, lui aussi, compte. Il effectue des pesées même s'il ne dispose pas d'une balance équivalente à celle de Lavoisier et il tient compte de la loi de conservation des masses (57). De plus, la pratique de Lavoisier est plus complexe qu'il n'y paraît. La précision qu'il invoque régulièrement fait problème non seulement du fait de l'absence de définition générale des conditions d'une bonne mesure, mais aussi parce le **calcul** qui la fonde n'a rien d'évident. La question de la décomposition de l'eau suffit à illustrer l'enjeu.

En juin 1783, après avoir appris que le philosophe naturel anglais Henry Cavendish a obtenu de l'eau en faisant réagir de l'*air inflammable* et de l'air courant ou de l'*air inflammable* et de l'oxygène (avec dans ce cas production conjointe d'acide nitrique), Lavoisier entreprend une première manipulation qui conforte son opinion que l'eau formée résulte de l'association des deux gaz. En novembre 1783, il présente une forme développée de l'expérience devant l'Académie. L'argument de la conservation des masses fonde l'affirmation de la correspondance "poids pour poids" entre les gaz introduits et l'air obtenu, mais le dispositif est rudimentaire et contesté, en particulier pour la pureté des gaz et les mesures de volume (58). Lavoisier répond en déplaçant le terrain avec une série d'expériences sur la décomposition de l'eau. Pour cela, il étend le dispositif afin de le rendre moins fragile. D'une part, il s'attache la collaboration du mathématicien Meusnier. D'autre part, il obtient le soutien de l'Académie. La commission chargée d'enquêter sur les perspectives ouvertes en juin 1783 par la réussite des frères Montgolfier voit son ordre du jour complété par la question de la production, en grandes quantités, de l'*air inflammable* (afin d'en remplir des ballons ascensionnels).

Meusnier et Lavoisier choisissent de décomposer l'eau dans un canon de fusil rempli de limaille de fer et chauffé au rouge en condensant et collectant la vapeur n'ayant pas réagi, en pesant le canon de fusil avant et après réaction, en mesurant le volume de gaz hydrogène recueilli (figure 4). Une fois encore, la mise en équation impose une construction complexe : pour éviter l'oxydation par l'air extérieur, Lavoisier fait entourer le canon d'un bobinage de fil de fer aux mailles remplies de charbon et fait recouvrir le tout de

plusieurs couches d'argile. Il faut aussi faire les corrections pratiques. Le serpentin qui recueille l'eau qui n'a pas réagi s'imprègne de liquide qu'on ne peut pas peser après égouttage. Lavoisier le fait donc mouiller avant expérience et essaie de standardiser les égouttages avant et après expérience.

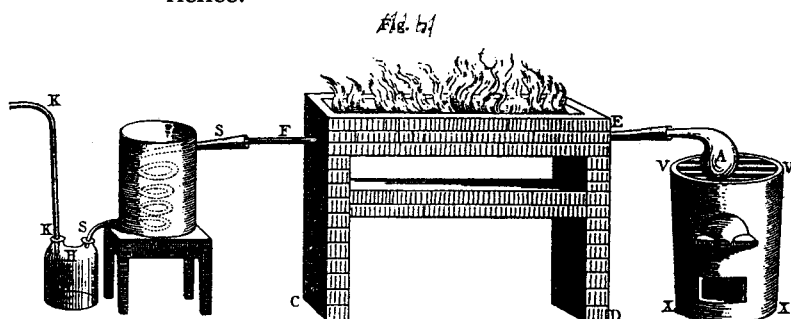


Figure 4

A. de Lavoisier (1789). Le dispositif utilisé pour décomposer l'eau.

Pour les expériences de recombinaison, l'évaluation des volumes de gaz exige la construction d'un dispositif encore plus complexe comprenant non seulement deux gazomètres (figure 3) mais aussi un système de canalisation et de stockage permettant d'évaluer les airs résiduels, et finalement un dispositif d'ignition à l'aide d'une machine électrostatique. La "démonstration par le calcul" consiste alors à admettre puis mettre en scène la conservation des masses pour produire une relation réactants/produits qui permette de calculer le rapport des masses d'hydrogène et d'oxygène dans la composition de l'eau (en l'occurrence 1 pour 5,6). Dans les deux cas, les corrections ne s'arrêtent pas à l'écriture des bilans mais à l'interprétation des déficits et excès finalement constatés. L'idéal de mesure précise pourrait tourner au cauchemar si Lavoisier ne savait pas ce qu'il veut mettre en avant : une association de une partie d'oxygène pour deux parties d'hydrogène (59).

Priestley est loin d'être convaincu de la possibilité et de l'intérêt de ces déterminations. Il attaque Lavoisier pour l'abondance et la complexité des corrections nécessaires à la moindre conclusion sur le rapport masse de gaz/masse d'eau formée : Lavoisier ne peut par exemple pas savoir quelle est la part de l'eau apportée avec ses deux gaz, un bilan quantitatif exact n'étant guère possible **en pratique**. Pour Priestley la mise en équation des proportions réactants/produits a une valeur non pas empirique mais interprétative et doctrinaire. De même, Lavoisier ne peut pas évaluer la contribution de "principes" comme le calorique ou le phlogistique que l'on ne retrouve pas dans les bilans. Enfin, le plus grave, c'est que Priestley ne peut pas reproduire les faits annoncés : l'eau qu'il obtient n'est pas pure,

c'est (comme pour Cavendish) un mélange contenant de l'acide nitrique conformément à la nature supposée de l'*air déphlogistique* (60). La théâtralisation de la nouvelle chimie trouve son point d'orgue lorsque Lavoisier décide d'organiser en grand les expériences de décomposition/recomposition de l'eau en février 1785, en présence des commissionnaires de l'Académie Royale des Sciences qui viennent observer, assister les auteurs et surtout poser les scellés sur les appareils et signer les registres de Lavoisier afin de témoigner de la conformité des calculs à ce qu'ils ont vu.

Considérées dans leur globalité, les différences de pratique et de méthodologie qui opposent Priestley et Lavoisier témoignent de deux modes de vie scientifiques que les historien(ne)s ont mis en rapport avec la nature des communautés savantes et le rôle contrasté des philosophes naturels dans les sociétés d'Ancien Régime britannique et française (61). L'empirisme des Anglais illustré par la culture de la réplication, la circulation des savoir-faire, le pragmatisme instrumental et l'**opposition aux généralisations** va de pair avec une figure de savant sans liens directs avec le pouvoir politique, collaborant sur un pied d'égalité (formelle) avec les artisans, attentif à l'utilité marchande, membre d'une collectivité aux frontières mouvantes incluant amateurs et conférenciers itinérants. À l'inverse, la communauté française est beaucoup plus hiérarchisée avec au centre, l'Académie et ses savants "professionnels" qui définissent la **loi naturelle**, applicable en tous lieux et en tous temps, acquise par la construction fragile de l'uniformité expérimentale. Considérant le monde des artisans comme étranger, cette élite entretient avec lui deux sortes de commerce : d'une part, la commandite ; d'autre part, la rationalisation des techniques et leur enseignement. Placés dans une position de "service public" à cause de l'appui du Roi, les Académiciens sont méfiants vis-à-vis du "commerce" et soucieux de réformes qui réconcilieraient les besoins de l'État et l'intérêt du public (62). Ainsi, ce que laisse percevoir la querelle du phlogistique et de l'oxygène, c'est le contraste entre la société civile des débuts de la révolution industrielle anglaise et le mouvement encyclopédiste de la fin de la monarchie absolue en France.

savants
d'Ancien Régime,
Lumières et
révolution
industrielle

4. POURQUOI REJOUER LA GUERRE DU PHLOGISTIQUE ET DE L'OXYGÈNE ?

Tout cela est bel et bon pour l'historien, mais que peut bien en faire un pauvre élève qui a bien du mal à donner un sens à la notion de gaz, ou à réussir l'écriture d'un bilan réactionnel ? Posée en ces termes, la question n'appelle qu'une réponse : il faut apporter l'histoire des sciences à doses homéopathiques. On a vu qu'interroger les cultures spontanées pouvait suggérer l'intérêt d'une pratique de "transfert"

où l'on rejouerait la "guerre du phlogistique et de l'oxygène" pour révéler et déplacer des représentations spontanées en **guidant**, sans trop d'ambiguïté vers la solution de l'énigme : le savoir chimique qu'il conviendra de retenir. L'inconvénient d'une telle organisation est qu'elle ne peut pas prendre au sérieux la pratique de découverte, en particulier la difficile gestion de l'incertitude expérimentale et la sous-détermination épistémologique de la controverse historique. Ces limites laissent entrevoir deux horizons possibles pour une extension des usages de l'histoire au-delà de séquences centrées sur les expériences cruciales (63). D'une part, le rôle des savoir-faire expérimentaux dans la mise en place, l'acceptation ou la circulation des schèmes cognitifs : par exemple, les liens entre la genèse des dispositifs de mesure des volumes et des masses des gaz, la substitution calorifique/phlogistique et les définitions respectives des "principes" et des "éléments". D'autre part, la pratique de la science comme une activité collective, d'ordre probabiliste, procédant d'une hiérarchisation d'objectifs, d'hypothèses et de valeurs illustrée par le débat sur la quantification et la précision.

La recherche d'un **dispositif** de pédagogie des sciences **centré sur la narration historique** nous semble pouvoir répondre à trois séries d'objectifs.

A. Des enjeux épistémologiques

- Donner une image moins figée et inaccessible de la science en montrant que la genèse des savoirs n'est pas un processus d'illumination géniale ou le résultat de la seule observation de la nature, mais passe par un travail de construction des objets et des choix.
- Renforcer les capacités critiques en montrant que la science n'est pas une accumulation linéaire de "vérités" de plus en plus "vraies", mais une activité sociale riche en controverses et négociations, dépourvue de solutions de continuité logiques.

B. Des enjeux de culture et de méthodologie historique

- Donner une image plus complète du mouvement des Lumières en y intégrant l'expansion de la philosophie naturelle.
- Préciser la diversité des sociétés d'Ancien Régime et de leur transformation par la Révolution et la révolution industrielle en comparant France et Grande-Bretagne pour ce qui est de la nature des institutions scientifiques, du rôle des savants et de leurs relations aux différentes couches de la société.
- Montrer comment un texte scientifique peut être traité comme un document historique en interrogeant ses conditions d'écriture, sa forme, ses destinataires.

les objectifs
d'une réplique
ouverte

C. Des enjeux de culture scientifique

- Donner aux élèves l'occasion de faire jouer un ensemble d'hypothèses, de manipulations et d'interprétations sur la combustion, la nature des gaz et les réactions d'oxydation.
- Renforcer le sens de la pratique de laboratoire en donnant la possibilité d'une expérimentation ouverte sur la manipulation et les propriétés des gaz.
- Faire approcher la cohérence (et les présupposés) de notre conception de l'oxygène comme élément gazeux, des oxydations comme des réactions équilibrées avec conservation de la masse, en mettant en scène le conflit entre les innovations de la "Révolution chimique" et les représentations antérieures porteuses d'analogies avec les notions couramment partagées par les élèves.

comment clore
la controverse ?

Pour cela, il faut toutefois accepter d'utiliser la controverse d'Ancien Régime pour multiplier les possibilités de manipulations et d'interprétation et recréer une situation d'incertitude qui, à l'inverse de l'illusion de la découverte, sera canalisée par la matière historique. Pour l'enseignant-historien, l'ambiguïté de l'approche tient au fait qu'en "reproduisant" les manipulations de Lavoisier ou Priestley on joue avec l'anachronisme en s'appuyant sur un réalisme minimal qui consiste à admettre que si l'oxygène de Lavoisier n'est pas le même que le nôtre, la bougie qui s'éteint sous une cloche de verre aujourd'hui ressemble suffisamment à la bougie qui s'éteint sous les cloches dans les textes de Priestley et Lavoisier pour que l'on puisse éclairer l'une par l'autre. Ce, tout en sachant qu'on ne reproduit pas leurs expériences ; qu'on ne peut pas percevoir, réfléchir et interpréter comme il y a plus de deux siècles. Pour l'enseignant-chimiste, la difficulté tient à la nécessité de négocier l'équilibre entre, d'une part, une présentation "symétrique" destinée à préserver la situation d'**incertitude** indispensable à la prise au sérieux du jugement scientifique et à l'apprentissage du choix circonstancié et, d'autre part, une introduction au point de vue contemporain pour comprendre que notre chimie de la combustion hérite plus de Lavoisier que de Priestley. La solution retenue ne peut être que pragmatique. Un travail sur les textes successifs de Lavoisier peut, par exemple, permettre de relativiser le caractère décisif de l'expérience isolée pour créer la dissymétrie et laisser jouer "le temps" en faveur de Lavoisier.

Comme toute pratique pluri-disciplinaire, cette juxtaposition est génératrice de mauvaise science (on perd du temps sur des expériences mal faites ou des idées fausses) et de mauvaise histoire (on élimine des pans entiers de la culture scientifique passée et on en tord la perception par la confrontation à nos matériaux et à nos pratiques). Son intérêt est qu'elle facilite la construction d'une situation socio-cognitive plus ouverte.

Comme Lavoisier ne l'a jamais dit : "Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme". En pédagogie comme en philo-

pragmatisme
pédagogique et
usages de
l'incertitude

sophie naturelle. En conséquence, on peut s'attendre à ce que l'utilisation d'une séquence qui privilégie pratique pluridisciplinaire, jugement critique et apprentissage des savoir-faire se paie d'un prix en termes d'accumulation de connaissances. L'enjeu n'est pas spécifique aux articulations entre histoire des sciences et pratique pédagogique, c'est celui de la négociation d'un équilibre entre "esprit de système" et "esprit de découverte". La controverse Priestley/Lavoisier et ses usages suggèrent toutefois que l'intérêt d'une transposition pédagogique des situations de controverse tient justement de la possibilité de renouveler notre image de la science et les termes du conflit à partir des matériaux fournis par la "fabrique" de la science.

Jean-Paul GAUDILLIÈRE
INSERM U 158
Hôpital Necker-Enfants Malades
Paris

NOTES

- (1) Dans la mesure où cette réflexion s'appuie sur des travaux étrangers à mon domaine d'élection, je tiens particulièrement à remercier les spécialistes de Lavoisier, du XVIII^{ème} siècle et de l'histoire des sciences physiques qui par leur travail, leurs conseils et critiques ont permis à ce texte de voir le jour : Bernadette Bensaude-Vincent, Christine Blondel, Christian Licoppe et Otto Sibum. Toute la responsabilité des opinions, erreurs et omissions est évidemment mienne.
- (2) SHORTLAND M., WARWICK A. (eds), (1989), *Teaching the History of Science*, Oxford.
- (3) Department of Education and Science and the Welsh Office (1989), *Science in the National Curriculum*, London, HMSO.
- (4) Le texte introductif de l'objectif 17 (The nature of science) du *National Curriculum* dit ainsi : "*Pupils should develop their knowledge and understanding of the ways in which scientific ideas change through time and how the nature of these ideas and the uses to which they are put are affected by the social, moral spiritual and cultural contexts in which they are developed.*"
- (5) RAICHVARG D. (1987), "La didactique a-t-elle raison de s'intéresser à l'histoire des sciences ?" *Aster*, n° 5.
- (6) GIORDAN A., DE VECCHI G. (1988), *L'origine des savoirs. Des conceptions des apprenants aux savoirs scientifiques*, Delachaux-Niestlé.
DRIVER R., GUESNE E., TIBERGHEN A. (eds), (1985), *Children's Ideas in Science*, Open University Press, Stratford.
- (7) KNOX J. (1985), *A Study of Secondary Student's Ideas about the Process of Burning*, M. Ed. thesis, University of Leeds.
DRIVER R., "Beyond Appearances : The Conservation of Matter under Physical and Chemical Transformations", in DRIVER et al, op. cit. réf (6), p. 145-169.
- (8) Voir aussi : MÉHEUT M., SALTIEL E., TIBERGHEN A. (1985), "Student's conceptions about combustion (11-12 years old)", *European Journal of Science Education*, Vol 7, p. 83-93.
MÉHEUT M. (1989), "Des représentations des élèves au concept de réaction chimique : premières étapes", *Bulletin de l'union des physiciens*, numéro 716, p. 997-1012.
- (9) Correspondant par exemple aux différentes composantes d'un profil épistémologique telles qu'un Bachelard pouvait les décrire.

- (10) Sur ce point, voir les contributions de GOODING D., SHAPIN S. in *Teaching the History of Science*, op. cit. réf. (2).
 Voir aussi : GAUDILLIÈRE J.-P. "L'histoire des sciences peut-elle servir la didactique ? Le constructivisme cognitif entre épistémologie et histoire sociale", in *La méthode et les méthodes*, Amiens, CRDP, sous presse.
- (11) PUMFREY S. "The Concept of Oxygen, Using History of Science in Science Teaching", in réf. (2), p. 142-155.
- (12) La littérature sur la Révolution Chimique est très importante. Pour une première analyse, on pourra se référer à BENSAUDE-VINCENT B. et STENGERS I. (1993), *Histoire de la chimie*, Paris, La Découverte. Pour une présentation des tendances récentes de l'historiographie, voir le numéro spécial de la revue *Osiris* paru en 1988. Sur Lavoisier comme "fondateur-précurseur" de la révolution chimique voir BENSAUDE-VINCENT B. (1993), *Lavoisier*, Flammarion, Paris, 1993.
- (13) On a choisi de respecter ici la nomenclature des gaz existant avant la "réforme" de Lavoisier (cf. infra). On prendra donc pour définition des différents airs leurs conditions de production et/ou leurs principales propriétés.
Air fixe : à la suite de Joseph Black, le terme est utilisé pour désigner l'air spécifique obtenu par traitement acide de la chaux magnésienne ou de la craie. Il est irrespirable et ne permet pas la combustion d'une flamme.
Air nitreux : il est obtenu par Priestley par dissolution d'un métal (autre que le plomb ou le zinc, généralement du cuivre) dans l'acide nitrique (esprit de nitre) ; il est caractérisé par une réaction avec l'air qui produit des fumées rouges temporaires et un acide ; il est irrespirable, mais permet la combustion d'une flamme.
Air inflammable : il est obtenu par Cavendish à partir de la dissolution d'un métal dans l'acide sulfurique (acide vitriolique) ; il est caractérisé par sa réaction violente avec l'air et son inflammabilité.
Mofette : le terme est utilisé pour désigner les airs non respirables, ne permettant pas la combustion.
 Les correspondances habituellement retenues sont les suivantes : air fixe et dioxyde de carbone, air nitreux et monoxyde d'azote, air inflammable et hydrogène, mofette et azote.
- (14) Par analogie avec la transformation de la craie en chaux, la calcination d'un métal désigne alors la formation d'une chaux métallique par chauffage au contact de l'air.
- (15) Pour Georg Stahl, qui en a fait un concept clé, le phlogistique est une matière subtile unifie les différentes manifestations associées aux réactions qui font intervenir l'air, les terres et le feu : dégagement de chaleur, de lumière, de vapeurs expansibles. Le phlogistique s'échappe lors de la combustion du charbon, de la calcination et de la corrosion des métaux. Il est parfois aussi plus directement "matière du feu" comme pour le chimiste français Rouelle. Voir : BENSAUDE-VINCENT B., STENGERS I., op. cit. réf. (12).
- (16) Pour cette partie : MC EVOY J. (1975), *Joseph Priestley : Philosopher, Scientist and Divine*, University of Pittsburgh, PhD thesis.
- (17) Il s'agit d'une chaux rouge obtenue en faisant bouillir du mercure pendant très longtemps ou encore en dissolvant le métal dans de l'acide nitrique puis en précipitant la solution.
- (18) DAUMAS M. (1955), *Lavoisier théoricien et expérimentateur*, Paris, Presses Universitaires de France.
- (19) Sur l'utilisation de la balance par Lavoisier, voir BENSAUDE-VINCENT B., op. cit. réf. (12).
- (20) GCSE : General Certificate of Secondary Education, passé vers quinze-seize ans.
- (21) *Chemistry for the GCSE*, Longham (1992). On a une structure analogue dans les manuels français qui introduisent Lavoisier. Voir par exemple : *Sciences Physiques Seconde*, Nathan.
- (22) Parmi les variantes : la mention des travaux de Schele ou l'abondance des détails biographiques sur Priestley et Lavoisier.
- (23) Voir annexe réf. (11).

- (24) Parmi les classiques voir DAUMAS M., op. cit. réf. (18).
 GUERLAC H. (1961), *Lavoisier - The Crucial Year : The Background and Origins of His First Experiment in Combustion in 1772*, Cornell University Press.
 MAC KIE D. (1980), *Antoine Lavoisier*, New York, A Da Capo.
- (25) HOLMES F.L. (1985), *Lavoisier and the Chemistry of Life*, Madison, Wisconsin University Press.
 PERRIN C.E. "Research Traditions, Lavoisier, and the Chemical Revolution". *Osiris*, Vol. 4, 1988, p. 53-81.
 GOUGH J.B. "Lavoisier and the Fulfillment of the Stahlian Revolution". *Osiris*, Vol. 4, 1988, p. 15-33.
- (26) HOLMES F.L., op. cit. réf. (25), Chapter 2, "Lavoisier in Midstream".
- (27) PRIESTLEY J. (1790), *Experiments and Observations on Different Kinds of Air*, Birmingham, Vol I p. 354-364.
- (28) La question n'est pas ici celle de la standardisation : il n'y a aucune indication que Lavoisier ait procédé d'une façon plus proche de celle de Priestley et il n'y a aucun moyen de savoir ce qui a changé par rapport aux premières observations.
- (29) GUERLAC H., op. cit. réf. (24).
 MORRIS R.J. "Lavoisier and the Caloric Theory", *British Journal for the History of Science*, 1972, Vol. 6, p. 1-38.
 SIEGFRIED R. "Lavoisier's View of the Gaseous State and Its Early Application to Pneumatic Chemistry", *Isis*, 1972, Vol. 63, p. 59-78.
 CROSLAND M. "Lavoisier's Theory of Acidity", *Isis*, 1973, Vol. 63, p. 349-355.
 MC EVOY J. (1987), "Causes and Laws, Powers and Principles : The Metaphysical Foundations of Priestley's Concept of Phlogiston", in *Science, Medicine and Dissent. Joseph Priestley (1733-1804)*, London, Wellcome Trust, p. 55-71.
 Voir aussi : PRIESTLEY J. (1776), *Experiments and Observations on Different Kinds of Air and Branches of Natural Philosophy connected with the subject*, Birmingham, II. Traduction française, Paris 1777, p. 33-55.
 HOLMES F.L. "Lavoisier's Conceptual Passage", *Osiris*, 1988, Vol. 4, p. 82-94.
 Voir aussi les conclusions du mémoire de 1775 sur l'expansibilité : LAVOISIER A. "Mémoire sur la nature du principe qui se combine avec les métaux pendant leur calcination, et qui en augmente le poids", *Mém. Acad. Sci.* 1775 (publié 1778), p. 520-526.
- (30) HOLMES F.L. *Lavoisier and the Chemistry of Life*, Chapter 1, "An Ambitious Agenda".
 KOHLER R. "Lavoisier's Rediscovery of the Air from Mercury Calx : A Reinterpretation", *Ambix*, Vol. 22, 1975, p. 52-57.
- (31) HOLMES F.L. *Lavoisier and the Chemistry of Life*, Chapter 4, "Respiration and a general theory of combustion".
- (32) Voir aussi les contributions des historiens du XVIIIème siècle sur la politique de Priestley :
 PARKER J. (1914), *Dissenting Academies*, Cambridge, Cambridge University Press ;
 GARRETT C. (1975), *Respectable Folly : Millenarians and the French Revolution in France and England*, Johns Hopkins University Press.
 Voir aussi ses liens avec les artisans et industriels : SCHOFIELD R.E.(1963), *The Lunar Society of Birmingham. A social History of Provincial Science and Industry in Eighteenth Century England*, Oxford, Clarendon Press.
 Sur l'agronomie et l'économie politique de Lavoisier : MAC KIE, op. cit. réf. (24) 1980.
 Sur son rôle à l'Académie Royale des Sciences : HAHN R.(1971), *The Anatomy of a Scientific Institution, The Paris Academy of Sciences*, p. 1666-1803, Berkeley, University of California Press.
- (33) GOLINSKI J. (1991) *Science as Public Culture. Chemistry and Enlightenment in Britain, 1760-1820*. Cambridge, Cambridge University Press.
 STEWART J. *The Rise of Public Science. Rhetoric, Technology and Natural Philosophy in Newtonian Britain, 1660-1750*, Cambridge University Press.
- (34) MAC EVOY J. Thèse, op. cit. réf. (16), p. 145-166.
- (35) GOLINSKI J. (1991), *Science as Public Culture*. Chapter Four : "Airs and their uses".
 SCHOFIELD R.E., op. cit. réf. (32).

- (36) GOLINSKI J, op. cit. réf. (33), p. 105-116.
 PRIESTLEY J. (1777), *Expériences et observations sur les différentes sortes d'air*, Paris, Vol. III, p. 90-94, p. 228-258.
- (37) MAC EVOY J. Thèse, op. cit. réf. (16), p. 220-229.
 PRIESTLEY J., op. cit., vol. I., p. 140-154.
- (38) SCHAFFER S. (1990), "Measuring Virtue : Eudiometry, Enlightenment and Pneumatic Medicine", in *The Medical Enlightenment of the XVIIIth Century*, Cunningham A., French R. (eds), Cambridge University Press.
 GOLINSKI J., op. cit., p. 117-128.
 Lavoisier lui même en fait un instrument de "santé publique" : HOLMES F. (1985), op. cit. réf. (25), p.94-95.
- (39) SCHAFFER S. (1987), "Priestley and the Politics of Spirit" in *Science, Medicine and Dissent. Joseph Priestley (1733-1804)*, London, Wellcome Trust, p. 39-53.
- (40) MAC EVOY J. (1987), "Causes and Laws, Powers and Principles : The Metaphysical Foundations of Priestley's Concept of Phlogiston", in *Science, Medicine and Dissent. Joseph Priestley (1733-1804)*, London, Wellcome Trust.
- (41) MAC EVOY J. Thèse, op. cit. réf. (16), p. 203-209.
- (42) PRIESTLEY J. (1790) *Experiments and Observations on Different Kinds of Air and Branches of Natural Philosophy connected with the subject*, Birmingham, Trad. française, vol. II, p. 120-125.
- (43) LICOPPE C. "La Naissance de la physique expérimentale à la fin du XVIIIème siècle". Manuscrit non publié.
- (44) GILLISPIE C., (1980), *Science and Policy in France at the End of the Old Regime*, Princeton University Press, chapter 1 et chapter 6.
- (45) GILLISPIE C., op. cit., p. 65.
- (46) GILLISPIE C., op. cit., p. 67.
- (47) Les *alkalis* sont les substances basiques obtenues à partir de la potasse ou de la soude.
- (48) LAVOISIER A. (1776), *Recueil de mémoires et d'observations sur la formation et sur la fabrication du salpêtre*, Paris.
- (49) MAUSSKOPF S.H. (1988), "Gunpowder and the Chemical Revolution", *Osiris*, Vol. 4, p. 93-118.
- (50) "...la détonation du nitre n'a pas lieu sans l'addition de charbon, ou de quelque corps qui contient du phlogiston, et il est très possible que dans ces circonstances l'air commun soit converti en air fixe ; de là, il s'ensuivrait que l'air associé dans le nitre, et qui produit la terrible explosion de la poudre, serait de l'air atmosphérique commun privé de son expansibilité." Pour la publication du manuscrit, en 1778, Lavoisier transformera l'interprétation en fonction de l'introduction de l'oxygène et de sa nouvelle approche des acides et de l'air fixe : l'air combiné dans le nitre devient la partie hautement respirable de l'air et la détonation sera une conversion de celui-ci en air fixe en présence de charbon.
- (51) Pour une illustration d'un (ancien) régime de constitution du savoir basé sur le témoignage collectif et la présence sensible (visible) du phénomène se distinguant de la version "radicale" de Priestley, on prendra les écrits de Boyle et son rôle dans la constitution de la Royal Society. Voir : SHAPIN S., SCHAFFER S. (1985), *Leviathan and the Air-Pump. Boyle, Hobbes and Experimental Life*. Princeton, Princeton University Press.
- (52) Voir par exemple, le commentaire de l'expérience de 1785 sur la composition de l'eau : "Cette expérience nécessite un appareillage si coûteux, et tant de précautions qu'on ne peut pas s'attendre à la voir souvent répétée ; et dans de telles circonstances on ne peut s'empêcher de suspecter l'exactitude du résultat de cette expérience et la certitude de la conséquence qu'on en tire". PRIESTLEY J. (1798), *Réflexions sur la doctrine du phlogistique et la décomposition de l'eau*, traduction française, Paris, p. 32.

- (53) "Il me paraît très extraordinaire qu'une théorie si nouvelle et si importante, qui renverse presque tout ce qui était le mieux établi en chimie, se trouve appuyée sur une base aussi peu solide puisque les expériences qui ont servi à la fonder, sont non seulement ambiguës et explicables par l'ancienne hypothèse, mais en très petit nombre". PRIESTLEY J. (1798), op. cit., p. 31.
- (54) Ainsi lors de la controverse sur la gazéification de l'eau qui oppose Priestley et Nooth, le premier est moins gêné par l'incapacité de Nooth à reproduire les manipulations que par le fait que cette impuissance signale l'exigence d'un savoir-faire exceptionnel qui mettrait en cause la diffusion du dispositif et son utilité. GOLINSKI J., op. cit. réf. (33) p. 114.
- (55) LICOPPE C. op. cit. réf. (43), p. 54-83.
- (56) LUNDGREN A. (1990), "The Changing Role of Numbers in 18th Century Chemistry", in Frangmyr T., Heilbron J.L., Rider R.E. (eds), *The Quantifying Spirit in the 18th Century*, University of California Press, p. 245-266.
- (57) MAC EVOY J. "Continuity and Discontinuity in the Chemical Revolution", *Osiris*, Vol. 4, 1988, p. 195-213.
- (58) PERRIN C. "Lavoisier, Monge and the Synthesis of Water", *British Journal for the History of Science*, Vol. 6, 1973, 424-428.
HOLMES F. op. cit. réf. (25), Chapter 7, "Water Divided".
LAVOISIER A. "Mémoire dans lequel on a pour objet de prouver que l'eau n'est point une substance simple, mais une combinaison binaire d'hydrogène et d'oxygène." Lu à la rentrée publique de la St Martin 1783. *Oeuvres II*, p. 341.
- (59) LAVOISIER A. op. cit. Introduction.
- (60) MAC EVOY J. op. cit. réf. (57), 1988, p. 206.
- (61) Au-delà de ce résumé succinct, voir : GOLINSKI J. op. cit. réf. (33) Chapter 3, Chapter 5 ; GILLISPIE op. cit. réf. (44), Chapter 2 ; HAHN R. (1990), *The Anatomy of a Scientific Institution, The Paris Academy of Sciences, 1666-1803*, Berkeley, University of California Press.
- (62) Par exemple dans les travaux de Lavoisier sur l'agriculture et l'économie politique. PERROT J.C. (1992), "Lavoisier" in *Une histoire intellectuelle de l'économie politique*, Paris, EHESS.
- (63) À ce propos voir la séquence sur la calcination du cuivre présentée par A. Giordan à partir d'un film réalisé dans une classe de chimie. GIORDAN A., DE VECCHI G., op. cit. réf. (6), p. 59-62.