

La mesurabilité de la matière : histoire de la mesure de l'ozone

Measurability of matter : history of ozone measurements

Stéphane CALLENS (*)

RÉSUMÉ

« Quand on connaît la vraie nature de la molécule d'ozone, on se rend compte que les idées justes se forment malgré l'histoire », disait BACHELARD. L'histoire de l'ozone est hachée par des césures brutales, épistémiques plus qu'historiques, qui peuvent renvoyer à une histoire générale de la mesure.

BACHELARD s'appuie encore sur l'idée d'un ordre inférieur sous-jacent où réside la simplicité. L'histoire de l'ozone a toujours indiqué que l'inférieur révèle des surprises, que le monde n'est pas une maison bien tenue à partir de la simple nomenclature des éléments chimiques. C'est un monde mélangé, varié, éphémère, aux comptes spéculatifs de processus de production qui combinent des précurseurs et des enchaînements d'origine naturelle et anthropique.

ABSTRACT

BACHELARD wrote « when the genuine nature of ozone molecule is known, it becomes clear that sound ideas are made despite history ». The history of ozone is interrupted with brutal breaks, more epistemic than historical, which can refer to a general history of measure.

Bachelard still base his argument on an underlying inferior order in which simplicity lays. The history of ozone has always indicated that what is inferior has always revealed surprises, that the world is not a well kept house from the list of the simple chemical elements. It is a mixed, varied and short-lived world with uncertain accounts of productive processes combining precursors and processes of natural and anthropic origin.

Tableau I.
Dates repères de l'histoire de l'ozone
Milestones in ozone history

DATES REPÈRES DE L'HISTOIRE DE L'OZONE
1840 : SCHOENBEIN conjecture que l'ozone est une matière.
1852 : première enquête médicale avec mesure de l'ozone de l'air.
1860 : la caractérisation chimique de l'ozone comme variété allotropique de l'oxygène est acquise (point d'arrêt de BACHELARD dans son ouvrage « Le Matérialisme rationnel »).
1881 : HARTLEY conjecture que l'ozone de l'atmosphère est responsable de la disparition d'une partie des ultraviolets.
1913 : Fabry conjecture que l'ozone filtrant les ultraviolets se localise dans la stratosphère.
1930 : Sidney Chapman développe la première théorie photochimique de formation de l'ozone dans l'atmosphère.
1944 : premier important smog de pollution photochimique à Los Angeles.
1974 : conjecture de MOLINA et ROWLAND sur la destruction de la « couche » stratosphérique d'ozone.
1987 : protocole de Montréal pour la protection de la « couche » d'ozone

(*) Historien des Sciences, économiste, Clersé, IFRESI FU 3 CNRS, 2, rue des Canonniers, 59800 Lille.
E-mail : callens@univ-lille1.fr

**« Sous le signe de la quantité, la matière est abandonnée au savant
par le philosophe » (BACHELARD) : fin de la philosophie
et début de l'épistémologie historique**

BACHELARD récapitulait à travers une histoire, celle de l'ozone, le thème de son ouvrage sur *Le Matérialisme rationnel* [1953]*. Il nous semble intéressant de reprendre cet exemple, car cette histoire a fait succéder aux épisodes narrés par BACHELARD des ozonométries très différentes les unes des autres, alors que BACHELARD ne s'était intéressé qu'à l'apparition de la caractérisation chimique de la matière, en l'occurrence, ici la molécule O_3 . « *Sous le signe de la quantité, la matière est abandonnée au savant par le philosophe* », ainsi s'achevait l'histoire de l'ozone racontée par BACHELARD. Celui-ci termine le récit au moment de l'apparition des théories atomiques en chimie, au milieu du XIX^e siècle. Nous voulons ici poursuivre cette histoire de l'ozone. Trois ozonométries vont succéder à cette première caractérisation de l'ozone. L'histoire de la philosophie a cultivé la variété des définitions de la matière, la variété des définitions la mesure qui lui succède relève de l'épistémologie historique.

1. Repères sur l'histoire de l'ozone

Reprenons le récit de BACHELARD. Il se consacre aux premières époques de l'histoire de l'ozone et se base sur une histoire de l'ozone écrite par le chimiste et homme politique Alfred NAQUET. Le cours de chimie de NAQUET marque la reconnaissance des théories atomiques en Chimie et celle de l'ozone comme une variété allotropique de l'oxygène, de formule O_3 . En 1785, rappelle NAQUET, VAN MARUM reconnaît que « *l'oxygène devient odorant lorsqu'on le soumet à l'action répétée de l'étincelle électrique* » [1860]. Cette odeur apparaît à VAN MARUM comme « *l'odeur de la matière électrique* ». Cette première définition de l'ozone fait de l'électricité une matière. L'expérience de la foudre et la reconnaissance de cette odeur en ce cas conforte VAN MARUM. Les définitions sensualistes de la matière au XVIII^e siècle – « *tout ce que je sens hors de moi et qui agit sur mes sens, je l'appelle matière* », dit Rousseau, dans l'*Emile* – sont celles de VAN MARUM. L'électricité agit sur les sens, il a une odeur, donc VAN MARUM l'appelle matière.

Cette odeur, le chimiste SCHOENBEIN lui donne d'abord un nom, l'ozone, du verbe grec

qui signifie « sentir ». Cependant, en 1840, « *il ne vise plus à déterminer la matière électrique pourvue de l'odeur électrique, il cherche en pur chimiste une substance chimique* » [1953]. Les procédés de fabrication et de concentration de l'ozone sont connus et ses propriétés de désinfectant vont conduire à une production industrielle de l'ozone. Cependant, le chimiste SCHOENBEIN n'arrive pas à la complète détermination chimique de l'ozone. Il pense d'abord à un peroxyde d'un autre gaz que l'oxygène, puis imagine ensuite deux variétés allotropiques à l'oxygène, l'ozone et l'antozone. « *Ces deux espèces d'ozone se composent entre elles comme les deux espèces d'électricité, elles se neutralisent l'une l'autre, lorsqu'on les met en contact et l'oxygène revient à l'état neutre* » [1856]. La caractérisation correcte de l'ozone par les chimistes ne viendra qu'un peu plus tard, au moment de l'avènement des théories atomiques en chimie.

« *Les corps sont constitués par une aggrégation de petites masses nommées molécules... La matière est tout ce qui jouit des caractères qui sont commun à tous les corps. A proprement parler, la matière est une abstraction ; phénoménalement, il n'y a que des corps* » [1883] : la chimie des théories atomiques apporte l'ordre d'une combinatoire de « petites masses ». La liste complète des éléments de cette combinatoire est presque entièrement déterminée. La relation simple de la molécule d'ozone à l'atome d'oxygène est déduite, tandis que l'on sait reconnaître la présence d'ozone par « *un papier rouge tournesol trempé dans une solution d'iodure de potassium* » qui vire au bleu. Cela permet d'établir les premiers constats ozonométriques. « *L'ozone existe dans les bois, dans les champs, partout où il y a une végétation active. Dans les grandes cités, au contraire, dans les maisons, partout où beaucoup d'hommes ou d'animaux sont réunis, l'ozone disparaît ou tout au moins diminue* » [1883]. L'ozone ayant des vertus désinfectantes, la première ozonométrie se veut aussi épidémiologie. « *Les épidémies sont-elles la cause ou le résultat de la disparition de l'ozone : c'est là un fait jusqu'ici non résolu* », dit NAQUET. Mais il accorde un rôle de désinfectant naturel de l'atmosphère à l'ozone, par conséquent grande épidémie voudrait dire carence d'ozone. « *L'ozone disparaît dans les grandes épidémies... Les épidémies tiennent-elles à la disparition de l'ozone qui n'étant plus là pour brûler les miasmes, laisse ceux-ci s'accumuler ?* ». Ou bien ne serait-ce pas les « miasmes » qui font disparaître le désinfectant naturel de l'atmosphère, se

(*) Les dates entre crochets renvoient aux références d'ouvrages.

demande NAQUET. De plus, à côté des épidémies « dont la cause est liée, directement ou indirectement, à la disparition de l'ozone, on a pensé qu'il pourrait y en avoir qui seraient dues à son excès. Et comme l'ozone irrite les organes respiratoires, on a placé dans cette catégorie les épidémies de gripes et d'affections catarrhales en général » [1860].

Les premières mesures de l'ozone dans l'atmosphère datent des années 1850. Les interrogations sur le choléra font que « des médecins et des physiologistes ne tardèrent point à se demander s'il n'y avait pas un rapport étroit entre la présence et l'absence de l'ozone atmosphérique et la manifestation et la cessation de certaines épidémies... Cette pensée imprima un mouvement qui... débuta en Allemagne, à KOENIGSBERG. En 1852, la société de médecine décida qu'une commission... ferait pendant un an des observations ozonométriques dans la ville... Ces observations portèrent sur 6 251 maladies aiguës, mais les médecins ne parvinrent pas à constater un rapport certain entre les maladies observées et la quantité d'ozone contenue dans l'atmosphère » [1856].

En France, l'ozonométrie de l'atmosphère au niveau du sol apparaît avec HOUZEAU en 1858. Pour Paris, il faut attendre 1877 pour avoir des séries statistiques publiées sur les taux d'ozone. Elles seront continuées jusqu'en 1908. Puis ces séries statistiques de mesures au sol connaîtront environ 70 ans d'interruption.

Nous pouvons dresser un tableau récapitulatif de l'histoire de l'ozone. L'accent se déplace d'une définition de la matière au montage d'opérations de mesure. Le récit de BACHELARD s'arrête avant le début de la première ozonométrie, de celle de l'Observatoire météorologique de Paris. Alors la substance cosmique entre au laboratoire. Elle ne s'y cloître pas. En 1881, HARTLEY fournit l'explication possible d'un phénomène qui intrigue tous les physiciens, la disparition subite des ultraviolets à partir d'une certaine longueur d'ondes. HARTLEY conjecture que l'ozone atmosphérique est responsable de ce phénomène [1881]. Les parties basses de l'atmosphère vont être alors délaissées pour les parties hautes, plus précisément l'étage de la stratosphère où se localise l'ozone responsable de la disparition brutale des ultraviolets à partir d'une certaine valeur de longueur d'onde. Cette seconde ozonométrie est celle de Charles FABRY, qui localise l'étage où se situe la « couche » d'ozone, et organise le premier congrès scientifique sur l'ozone en 1929. Yves ROCARD explique la même année comment un gaz lourd comme l'ozone réussit à rester dans la stratosphère. Les travaux sur l'ozone stratosphérique des congrès successifs sont centrés sur la mise au point de protocoles de mesures et l'exploitation de résul-

tats de campagnes de mesures, par appareils au sol, puis par ballons-sondes.

Enfin, une troisième ozonométrie voit le jour, après les premiers smogs constatés à Los Angeles en 1944, dans un article qui conjecture la nature des précurseurs chimiques, oxydes d'azote (NOx) et composés organiques volatils (COV), du smog de la pollution photochimique [1952].

L'ozone comme polluant de la troposphère dépend entièrement de la présence des précurseurs et du rayonnement solaire. Le travail sur les cycles biogéochimiques de formation et de décomposition de l'ozone conduit à l'article de M. MOLINA et S. ROWLAND en 1974 dans *Nature* sur la destruction de la couche d'ozone par des gaz très stables chimiquement, les chlorofluorocarbures. Le cycle de vie court de l'ozone dans l'atmosphère est interrogé dans son renouvellement et dans les interactions qu'il entretient avec le vivant, l'inerte et la société plus généralement, au contraire de l'ozonométrie de FABRY à peu près muette sur la formation de l'ozone et fuyant toute interférence chimique et anthropique. L'ozonométrie contemporaine s'interroge sur les principales interactions qui conduisent au renouvellement permanent de l'ozone. Elle travaille dans de nombreux domaines par modélisations et maillages recouvrant avec la visée opérationnelle de réduire le risque, considération totalement absente de l'ozonométrie de FABRY.

L'histoire de l'ozone, mais plus particulièrement celle de l'ozonométrie, porte témoignage de deux grandes remises en cause. Une première s'opère dès la première moitié du XIX^e siècle : la matière perd son privilège de la mesurabilité, avec QUETELET et POISSON. Des quantités immatérielles, des phénomènes biologiques et sociaux variables sont mesurables. Dans le domaine des phénomènes naturels, QUETELET avait été le fondateur d'un observatoire urbain à Bruxelles et avait joué un grand rôle dans le développement de la météorologie à l'échelle internationale. On retrouve le même type d'institutions et le même mouvement fondateur de la météorologie dans les observatoires de la première ozonométrie, comme celui de Paris, installé au parc Montsouris.

Avec GIBBS et BOREL, la mesure reste seule accessible, alors que l'élément dernier ne l'est plus. Pour prendre mesure, il faut se défaire de l'intuition géométrique. On ne peut plus avoir qu'une relation guidée par les formalismes et contre-intuitive avec la matière. Cela est clair pour le domaine de l'infra-atomique, des particules. Avec l'ozone, nous restons dans le domaine supra-moléculaire : nous ne descendons pas dans les profondeurs de la matière. Pour toutes les ozonométries, la compréhension de la matérialité passe par un long travail. Il s'agit, pour la première ozonométrie, du travail scrupuleux du laborantin, car les quantités sont particulièrement

Tableau II.
L'histoire de l'ozone : des interrogations centrées sur la matière à celles sur la mesure
Ozone history : from issues centered on matter to issues centered on measure

Repères dans l'histoire de l'ozone	Définition de la matière	Opérations de mesure	Domaine d'observation
L'odeur de la foudre (fin XVIII ^e siècle)	La matière se sent. Comme l'électricité sent, elle est matière		Nature
Enquêtes médicales (vers 1850)	La matière est principe actif : l'ozone désinfecte	Par papier imbibé d'un réactif chimique	Au chevet des malades
Première ozonométrie (1877 pour Paris)	La matière, un voile d'abstraction devant les « petites masses » des molécules (NAQUET)	Par barbotage : l'air passe dans une solution réactive	Troposphère (partie basse de l'atmosphère)
Ozonométrie des Congrès de Physique (1929)		Mises au point de protocoles pour cartographier l'insaisissable et curieux phénomène	Stratosphère
Ozonométries contemporaines		Modélisations et maillages recouvrant en vue de réduire le risque	Cycles biogéochimiques

faibles. Dans la seconde ozonométrie, il s'agit de s'assurer de la matérialité d'un voile protecteur autour de la sphère terrestre. La troisième ozonométrie est entièrement contenue dans l'interrogation sur la matérialité des risques. La première ozonométrie est encore traversée par la question : quelle étendue à la mesurabilité ? Avec une réponse en forme de démonstration de la mesurabilité d'un composant infime de l'atmosphère. L'ozonométrie contemporaine doit stimuler un accord sur la matérialité du risque, le degré de réalisme de modèles et de mesures et des actions pratiques à mettre en œuvre pour combattre le risque.

« *Quelle est l'essence de la matière ?* » est la question de FORMEY dans l'*Encyclopédie* à l'article « Matière ». Un siècle plus tard, la ques-

tion est : « *Quelle portée à la mesurabilité ?* ». Elle est devenue aujourd'hui : « *Quelle matérialité à la mesure ?* ».

Les deux grandes césures entre ces trois interrogations renvoient à deux épisodes de l'histoire des mathématiques. Le premier épisode est le développement des notions de fonction et de variable aléatoire ou de fonction mesurable dans l'Analyse mathématique des premières décennies du XIX^e siècle. QUETELET qui emploie positivement ces notions, COMTE et Claude Bernard qui s'y refusent, sont les témoins de ce premier acquis. Cela transforme l'interrogation. Le positivisme comtien se refuse à se poser la question de l'essence de la matière, pour s'interroger, de façon particulièrement réactive, sur la mesurabilité. Devant les avancées des mathématiciens,

Tableau III.
Deux césures dans l'histoire de la mesure
Two breaks in the history of measure

Epoque	Histoire de la mesure	Interrogation sur la mesure et la matière
Article « Matière » de l' <i>Encyclopédie</i> de d'ALEMBERT et DIDEROT.	(Définition traditionnelle de la mesure).	« Quelle est l'essence de la Matière ? » FORMEY préfère à « l'étendue » des cartésiens, la « solidité impénétrable » des newtoniens
Première césure du début du XIX ^e siècle	Les notions de variables aléatoires (ou de fonctions mesurables) sont acquises.	
XIX ^e siècle		« Quelle portée à la mesurabilité ? »
Seconde césure des années charnières entre le XIX ^e siècle et le XX ^e siècle	BOREL développe une théorie de la mesure qui fait émerger de nouvelles formes d'axiomatisation et se confond formellement avec la théorie des probabilités	« Quelle est la matérialité de la mesure ? »
XX ^e siècle		

COMTE restreint la mesurabilité au domaine des corps inertes. Avec COMTE, le matérialisme est d'abord censure de l'abstraction intellectuelle.

Le second épisode est le développement d'une théorie de la mesure par BOREL dans les années-charnières entre le XIX^e siècle et le XX^e siècle. Devant cette théorie axiomatisée de la mesure, la rupture consommée qu'elle introduit avec une géométrie instinctive et la problématisation de la relation entre la réalité et les modèles, la question du XX^e siècle est alors : « *Quelle est la matérialité de la mesure ?* ».

La succession des interrogations se fait sans qu'aucune réponse n'y soit apportée. Elles restent ouvertes. BACHELARD parlait de la succession de l'épistémologie historique à la philosophie, de la permanence de l'activité spéculative dans un détachement des sens. Cette désensualisation est l'épisode de la « lente et confuse découverte de l'ozone » avant 1860. La succession des trois ozonométries est une succession de programmes de recherches. La première ozonométrie se situe dans un courant de création d'observatoires météorologiques. La seconde ozonométrie se comprend comme emblématique d'un programme de constitution de l'astrophysique. L'ozonométrie contemporaine vise l'évaluation et la réduction des risques. Les trois programmes entretiennent une relation différente avec l'innovation dans l'instrumentation. Le premier programme est très large et ne fait que s'appuyer sur une innovation, le procédé de mesure de l'ozone par barbotage. L'innovation des procédés de mesure devient centrale dans la seconde ozonométrie, celle du programme de création de l'astrophysique. La troisième ozonométrie mobilise tout les moyens de mesure pour la formation d'un jugement collectif sur les questions liées à l'ozone. La figure schumpéterienne de l'entrepreneur innovant un nouveau procédé

de mesure qui est centrale pour la seconde ozonométrie, ne l'est plus dans ce troisième cas.

L'ozonométrie contemporaine a du reconstruire une série longue de mesures ; elle a eu la chance de pouvoir se baser sur une série de mesures quotidiennes, réalisées à Paris au parc Montsouris [1988].

2. La première ozonométrie : « météorologie, agriculture, hygiène »

« *La majeure partie de la physique est une opération de déblayage complexe et épuisante* », la mesure n'est ni exploration, ni confirmation ; « *c'est au cours de ces opérations de déblayage que la mesure assure sa fonction scientifique de loin la plus commune* » : Thomas KUHN résumait ainsi sa conception de la mesure et d'une « *connaissance scientifique, produit de groupe* ». Cette conception de la mesure convient à l'œuvre des météorologistes du parc Montsouris. Elle conviendrait beaucoup moins bien au programme exploratoire et de confirmation d'hypothèses de l'astrophysique naissante et Thomas KUHN, qui écrit ces lignes en 1957, témoigne que le type de conception de la mesure de la seconde ozonométrie n'était pas unanimement partagé.

Le parc Montsouris et son Observatoire municipal et public météorologique résulte d'une décision d'urbanisme : HAUSSMANN décide en 1868 la création de ce parc au Sud de Paris, y recrée la nature, avec cascade, lac artificiel, pavillon oriental et météorologues. Un programme complet de météorologie hygiéniste est élaboré. Les financements proviennent des deniers publics par la loi de finances de 1870 et de deniers municipaux, l'observatoire devant préciser la météorologie sanitaire des différents quartiers de Paris. La série de mesures de l'ozone commence en 1876, alors que le parc n'est pas encore achevé.

Le programme de l'observatoire comporte trois volets « météorologie pure, météorologie appliquée à l'agriculture, météorologie appliquée à l'hygiène ». La « météorologie pure » se décompose en « météorologie, magnétisme et électricité atmosphérique, physique de l'atmosphère ». La « météorologie appliquée à l'agriculture » se divise en « observations des phases de végétation, de la marche des récoltes... et de l'analyse de l'air et des eaux météoriques au point de vue des produits que cet air et ces eaux peuvent fournir à la végétation ». Enfin, la « météorologie appliquée à l'hygiène » comprend « *des observations météorologiques proprement dites à instituer sur les divers quartiers de Paris, des analyses chimiques faites périodiquement sur l'air qu'on y respire, et l'étude par le microscope et les procédés optiques de TYN-*



Illustration I.

Paris au temps de la série de mesures de l'ozone de l'Observatoire du Parc Montsouris : une pollution de l'air d'origine industrielle.

Van Gogh : *Usine à Clichy*, été 1887 (détail).

© St. Louis Art Museum

DALL des poussières de nature organique qui s'y trouvent en plus ou moins grande quantité, suivant les quartiers et les vents régnants, soit dans les temps ordinaires, soit dans les temps d'épidémie ou de simples endémies » [1877]. Les publications de l'Observatoire se présentent comme celles de l'Observatoire astronomique de Bruxelles, publications qui contiennent des relevés météorologiques.

Le personnel de l'Observatoire est composé de « physiciens » et de leurs aides. L'annuaire de l'Observatoire rend hommage à Henri SAINT-CLAIRE DEVILLE, le chimiste « maître aimé » de Pasteur. L'autre père spirituel de l'Observatoire municipal météorologique est DELAUNAY, celui qui avec des prouesses de méticulosité, a réussi le premier à mener les calculs d'une théorie analytique des mouvements de la lune. L'Observatoire semble tout à fait indépendant des milieux médicaux et positivistes, et étroitement lié aux milieux qui ont formé PASTEUR, dont des travaux ont porté sur la dissémination des maladies par voie aérienne, ce qui correspond tout à fait au programme de recherches de l'Observatoire de Montsouris.

L'Observatoire météorologique décharge sans doute l'Observatoire astronomique de Paris des tâches de relevés météorologiques ; son personnel est formé d'expérimentateurs utilisant à la fois l'analyse chimique des composants et des procédés météorologiques usuels dans un observatoire astronomique. Albert LÉVY, qui réalise les analyses chimiques de l'air, cale les valeurs lues sur les papiers réactifs par un étalonnage avec la méthode de barbotage : « *les papiers sont d'un emploi si commode qu'il est désirable de rechercher si l'on ne pourrait pas corriger les indications des erreurs qui les affectent* ». Ainsi, une graduation de 20 sur le papier réactif correspond à $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, de 10 à $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, et de 1 à $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans les conditions ambiantes. La série de mesures au Pic du Midi est réalisée par papier réactif, celle du parc Montsouris par « dosage à l'arséniate de potasse ». « *Deux barboteurs sont placés d'abord sur la terrasse du grand escalier de l'Observatoire, puis transportés dans le laboratoire spécial... Tous les jours à midi et demi on arrête la trompe, on mesure le volume d'air qui a passé depuis la veille. Après l'action de l'air sur la liqueur, on dose le volume d'arsénite restant... et l'on conclut par différence le poids d'arsénite transformé en arséniate et par suite le poids d'oxygène fourni par l'ozone. Le poids étant extrêmement faible, l'opération exige des précautions spéciales* » [1877]. La plage de variation des valeurs mesurées va de 5 à $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$, une valeur extrême isolée obtenue le 24 mai 1876. La comparaison sur la série du Pic du Midi donne un taux d'ozone cinq fois supérieur en 1990 à ce qu'il était en 1890. Dans les vingt pre-

mières années de la série, les valeurs moyennes sont stables, alors qu'aujourd'hui la croissance annuelle est de 2,4 %. La moyenne est inférieure à $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans les vingt premières années de la série. La décennie suivante est marquée par la première tendance à l'accroissement des valeurs. Charles FABRY explique de façon imprécise l'arrêt de la série de Montsouris en 1910 par la pollution des « fumées » : « *l'atmosphère de Paris, de plus en plus souillée par les fumées, était devenue trop défavorable à l'étude des phénomènes naturels* » [1930]. Le succès de la commercialisation des moteurs à essence pour les véhicules motorisés est simultané de la variation de la série. Le parc automobile est de 53 000 véhicules en 1910, parc concentré sur la région parisienne. Par « fumées », on ne sait pas ce que veut dire FABRY, s'agit-il de fumées d'usine ou des fumées des véhicules sur le boulevard Jourdan qui longe le parc Montsouris ?



Illustration II.
Paris au temps de la série de mesures de l'ozone
de l'Observatoire du Parc Montsouris :
absence de pollution de l'air issue des transports
par la route avant 1900.
Van Gogh : *Route aux confins de Paris*, été 1887
(détail).

Collection particulière

Les résultats obtenus s'inscrivent dans une compréhension de la circulation des masses d'air à grande échelle. Les crues relatives d'ozone ont lieu au printemps et « *la direction des vents exerce une influence très marquée sur les quantités d'ozone dosé. Toutes les fois que le vent tourne vers les régions Ouest et au Sud, l'ozone se manifeste de façon abondante* ». « *Quand le centre d'une bourrasque traverse la France, toutes les stations situées au sud de la trajectoire ont beaucoup d'ozone* » [1878]. Ces propriétés de transport à grande échelle subsistent et ces remarques nous permettent aujourd'hui de mieux comprendre ce qui relève de la simple circulation atmosphérique.

Ces transports à grande échelle ne sont pas pathogènes. L'Observatoire s'inscrit en faux

contre la thèse du transport mésoéchelle des agents pathogènes. « *Les transmissions effi- caces de maladie se font d'individu à individu, de salle en salle, de maison en maison, mais il est fort improbable que les germes nocifs aillent de ville en ville* ». L'ozone ne purifie pas l'air de tous « ses ferments » : « *quant à se soustraire aux microbes de l'air, la difficulté devient plus grande : la purification de l'air est loin d'être un problème résolu. L'air est donc le milieu où les ferments peuvent voyager, subsister longtemps et défier nos agents désinfectants les plus éner- giques* » [1882]. Dans l'air, le microbe triomphe de l'ozone. Les différentes séries de mesure montrent la non corrélation des crues épidé- miques et de la composition de l'air en ozone ou bactéries.

La première ozonométrie répond à la concep- tion de KUHN de la mesure : c'est du grand déblayage, le grand nettoyage des doctrines médicales de transmission aérienne des agents pathogènes et des principes actifs naturels comme l'ozone dans l'air. L'air joue à très grande échelle, il ne condescend pas à mettre en œuvre un miasme ou un désinfectant. La seconde ozo- nométrie va hériter d'un air neutre, inactif, dégagé de tout enjeu de santé publique.

3. L'ozonométrie de FABRY, manifeste de l'exploration spatiale

L'ozonométrie de FABRY n'est pas celle des grandes remises en cause. Elle est réaffirmation d'une physique, science de la mesure et science de la nature. Elle est sans doute à rapprocher du renouveau empirique en physique à cette épo- que, renouveau empirique dont le physicien N.R. CAMPBELL théorise la conception de la mesure. Cette conception est celle d'une mesure comme graduation. L'idéal est linéaire. Pourtant, FABRY insiste sur le caractère « instable » de l'ozone. La nomenclature des éléments chimi- ques autorise maintenant quelques mutations, depuis la découverte de la transmutation des élé- ments radionucléides. Cette instabilité n'entrave pas un idéal de compte-rendu métrique de cette matière.

FABRY utilise le premier les courbes d'absorp- tion du rayonnement ultraviolet, ce qui lui permet de vérifier la conjecture de HARTLEY : le gaz qui protège la terre d'une exposition intense aux ultraviolets est bien l'ozone. Il a pu déterminer la quantité d'ozone nécessaire pour cette absorp- tion des ultraviolets. Il déduit de la faible valeur de la masse d'ozone nécessaire qu'« *un mince voile d'ozone nous protège contre la partie nu- sible du rayonnement solaire* » [1935].

FABRY aborde ensuite le problème de la dis- tribution verticale de cet ozone. Il fait l'hypothèse d'une distribution uniforme de l'ozone : chaque

partie, haute ou basse, de l'atmosphère contien- drait une quantité équivalente d'ozone. Dans cette hypothèse « *la proportion de l'ozone dans l'air que nous respirons serait d'environ 1 litre dans 2 000 m³... L'ozone s'y révélerait aussitôt par son odeur* ». Cet ordre de grandeur est bien trop important pour les valeurs mesurées au sol, envi- ron 30 fois inférieures, bien que, note FABRY, « *la teneur en ozone augmente un peu* » au sol. Il faut donc que la distribution verticale de l'ozone soit inégale. Par un procédé optique de « *visée sur le soleil à son déclin* », il peut conjecturer que « *l'ozone se trouve principalement à quelque 30 ou 40 kilomètres d'altitude* » [1935].

FABRY n'a pas de conception bien arrêtée sur la formation de cette ozone. Il conjecture sim- plement que le soleil doit y être pour quelque chose, puisqu'il faut bien un apport d'énergie et que l'apport d'énergie qui lui semble le plus plau- sible est celui du rayonnement solaire. « *L'ozone... est un édifice dans un état instable. Comme beaucoup de régimes instables, celui-ci peut durer indéfiniment; il peut aussi se détruire spon- tanément, voire d'une manière explosive, et cette instabilité même communique à l'ozone une remarquable activité, que l'industrie chimique sait utiliser* ». FABRY dresse un bilan globalement positif de l'ozone protecteur de l'humanité, en règle générale, et, par exception, seulement « *désagréable dans les usines électriques à haute tension où il oxyde tout ce qu'il tou- che* » [1935].

« *Ce que nous observons est le résultat d'un équilibre compliqué, où toute la Physique inter- vient* » : FABRY pose la question de la formation de l'ozone, ce qui n'était pas le cas de la pre- mière ozonométrie. La première ozonométrie était celle d'une grande opération de simplifica- tion s'appuyant sur la réussite de la classification des éléments chimiques. L'atome est alors matière et fondement. La question de sa forma- tion n'est pas soulevée. L'histoire de l'ozone témoigne que la découverte de la transmutation atomique a des conséquences en dehors des éléments radioactifs. Un atome peut avoir un pré- curseur et le chimiste CHAPMAN élabore en 1930 la première théorie photochimique de for- mation et de décomposition de l'ozone atmos- phérique.

CAMPBELL définit la « *physique* », comme « *science de la mesure* ». Cette définition de CAMPBELL, ainsi que sa conception de la mesure comme une graduation, convient bien au nou- veau programme, celui de l'astrophysique, que FABRY compose à partir des problèmes de mesure de l'ozone stratosphérique. Le XX^e siècle ne présente pas une définition unifiée de la mesure. Sciences et technologies font coexister trois grands types de définition de la mesure, celle de la comparaison à une unité, celle d'une graduation, celle d'une probabilité. Dans l'ozo-

nométrie contemporaine, à travers les notions de risque et de probabilité, la matière ne respecte plus les cadastres. Ce n'était pas encore le cas avec FABRY. Il conçoit un programme d'astrophysique comme le mariage de la physique expérimentale et de l'observation à distance, que pratique l'astronomie. Des obstacles délimitent des plages d'exploration : ainsi le domaine de la basse atmosphère jusque 13 km de hauteur reste accessible à la mesure. Mais la stratosphère, et plus généralement la haute atmosphère, n'est pas directement accessible par aucun engin. Vers 1930, les ballons-sondes qu'utilisait FABRY ne dépassaient pas environ 15 km d'altitude, au lieu des 35 nécessaires. Plusieurs moyens sont envisagés, les fusées et le ballon à nacelle pressurisée de PICCARD.

L'ozone disqualifie PICCARD. PICCARD n'atteint que 16 km dans un ballon avec nacelle pressurisée. Le débat PICCARD-FABRY préfigure le débat stratégique de l'exploration de l'espace : soit avec des nacelles habitées, soit par engins automatiques. FABRY défend le développement de « gros instruments » au sol et l'exploration par engins automatiques. Il définit l'astrophysique dans la mise à distance de l'expérimentateur de l'objet mesuré : alors que la nacelle de PICCARD participe d'un programme d'expérimentation en site propre. « *La simple prise d'air n'a été effectuée que jusqu'à 13 000 mètres, sans d'ailleurs que l'analyse révèle la moindre trace de variation dans la composition de l'air* ». Certes, PICCARD a atteint 16 000 m, mais « *c'est la région bien au-dessus de cette limite qui est vraiment la haute atmosphère, celle qui reçoit directement ce qui vient des espaces célestes. Faut-il renoncer, jusqu'aux jours où de nouveaux moyens d'ascension auront été mis en œuvre, à rien savoir sur ce qui est, en somme, si près de nous ? Evidemment non. Nous savons bien des choses sur les planètes sans avoir la possibilité d'y aller voir ; comment serions-nous désarmés pour explorer un domaine si proche ? [1935]* ».

FABRY couple une relation aventureuse avec le cosmos et une instrumentation tournée vers les méthodes optiques et photométriques. « *Toute l'astrophysique actuelle eut été impossible sans l'invention de la plaque photographique* », tandis que la haute atmosphère n'est pour lui que l'antichambre du cosmos.

Dans ce programme, le risque n'a pas sa place. La pollution photochimique est caractérisée dès 1952, cependant le Symposium sur l'ozone atmosphérique que FABRY a initié n'a aucune approche qui puisse être qualifiée de tentative d'évaluation des risques. Au XX^e Symposium, en 1968, il s'agit toujours de comprendre la « *circulation générale et la répartition de l'ozone stratosphérique* » et pour la troposphère de s'interroger sur « *les formations d'ozone dans les*

cumulonimbus » [1968]. L'extrême variabilité de l'ozone ne fait que stimuler l'ardeur de ces géomètres du ciel.

4. L'ozonométrie contemporaine ou l'apprentissage des risques

Les travaux de CRUTZEN, l'article de MOLINA et ROWLAND sont les références qui jalonnent l'entrée dans une nouvelle forme d'intérêt pour l'ozone. CRUTZEN a montré les rôles des précurseurs NO_x et a ouvert la recherche sur les cycles globaux biogéochimiques. MOLINA et ROWLAND ont publié en 1974 dans la revue *Nature* sur la menace issue de certains gaz inertes pour la couche d'ozone stratosphérique. A leur remise de leur prix Nobel de Chimie, en 1995, ils ont tenu à souligner combien l'ozone reste source de « surprises », en positif ou en négatif.

BACHELARD généralisait une simplicité sous-jacente aux phénomènes, à l'image de la simplicité de la théorie atomique en chimie vis-à-vis des doctrines chimiques antérieures : « *le monde caché sous les phénomènes est plus clair que le monde apparent* ». Je ne pense pas que l'on puisse mettre ces travaux contemporains en chimie, domaine qu'affectionnait BACHELARD, sous cette bannière. Pour FABRY, l'ozone résultait d'un équilibre complexe durable, qu'il pensait peut-être d'origine électrique, à l'image de procédés de fabrication industrielle de l'ozone. Cette philosophie industrielle de la nature de FABRY « *accepte d'amplifier des faits qui frappent l'imagination* » au contraire de la pensée scientifique qui use d'une « *double restriction à l'égard d'une philosophie sensualiste et à l'égard d'une philosophie cosmique* » [1953]. La dissipation de la métaphysique industrielle de FABRY ne nous découvre pas une molécule bien rangée dans une nomenclature fixée. Sous les pavés de la philosophie de la nature, il n'y a pas la plage de la bonne physique réconciliée et sereine, l'accès à une harmonie sous-jacente, mais la compréhension de limites de l'intelligibilité, alors que nous sommes au plus près de la matière.

Le phénomène anthropique de la pollution photochimique participe aussi des phénomènes météorologiques. La grande ville reste un puits – c'est-à-dire un site où les résultats des équations chimiques de destruction de l'ozone l'emportent sur celles de formation – pour l'ozone. L'ozone anthropique ne fait que mieux souligner la variabilité des mouvements de la basse atmosphère, en insistant toutefois sur des transports d'échelle moyenne, la durée de vie d'une molécule d'ozone étant assez courte, d'environ quatre jours dans la troposphère.

La carte de la production d'un polluant industriel est simple. Des cheminées, des panaches

Tableau IV.
Mesure de l'ozone : de la quantification simple à un suivi du processus de formation
Ozone measurement : from simple quantification to modelisation of production

	Précurseurs	Formation de l'ozone	Mesure de l'ozone
Ozonométries historiques (Montsouris, Fabry) Ozonométries Contemporaines		(inconnue)	Protocole de mesure maîtrisé dans la troposphère ; évaluations rudimentaires pour la stratosphère
	Oxygène, oxydes d'azote et composés organiques volatils peuvent être mesurés	Modélisation possible des équations chimiques qui permettent la formation de l'ozone	Protocoles maîtrisés pour la stratosphère et la troposphère, mais insuffisance des réseaux de mesure au sol

qui suivent la direction des vents. Ces cartes permettent de distinguer la superposition des plans distincts, celui de la nature et celui de l'homme et des panaches de cheminées. Pour l'ozone, la nature a toujours fabriqué cette écume qui peut s'accumuler sur les reliefs sur lesquels viennent buter les transports des masses d'air. L'action humaine provoque une amplification de cette fabrication et des crues subites de sources d'ozone. Le tableau général multiplie les plans et les échelles avec « une production rapide d'ozone à partir de précurseurs réactifs et un transport à mésoéchelle puis à grande échelle, une production progressive au cours du transport de l'échelle régionale à l'échelle globale, un transport des précurseurs et une formation lente d'ozone à l'échelle globale, et des transports verticaux qui contribuent d'une part à l'apport dans la troposphère d'ozone provenant de la stratosphère, réservoir principal puisqu'il contient près de 90 % de la quantité d'ozone présente dans l'atmosphère, et d'autre part au transfert de l'ozone produit dans les couches inférieures polluées vers la troposphère libre » [1993].

Cette météorologie qui mêle l'anthropique et le naturel dans des épisodes localisés de pollution et dans une pollution permanente de fond amène une redéfinition des stratégies de réduction des risques. Le schème « cheminée-panache-aire polluée » reste prégnant. Les politiques mises en œuvre ont des principes et des dispositifs tactiques qui trahissent souvent leur formation à partir des pollutions de grands complexes industriels. La pollution photochimique dans l'hémisphère nord appelle un renouvellement de ces instruments. Nous voudrions terminer par quelques caractéristiques dont devrait tenir compte ces instruments.

1) Un renforcement local des moyens autour d'objectifs globaux ambitieux de réduction des risques. Pour une pollution soufrée, par exemple, si on multiplie les cheminées et les quantités locales, on augmente un niveau général de pollution de façon directe. La production locale de polluants photochimiques dans des épisodes inten-

sifs n'est pas une fonction linéaire de la quantité des précurseurs. Une réduction des risques passe par une gestion locale des risques agissant plus spécifiquement sur les précurseurs importants localement.

2) Une action globale est indispensable pour l'hémisphère nord, de par l'importance de la pollution de fond et de son incidence sur la végétation, les ressources agricoles, l'effet de serre et la santé.

3) L'apprentissage des risques liés à la pollution photochimique peut participer d'un renouvellement des principes de prévention, mettant l'accent sur les actions d'amont, d'incorporation des principes de réduction des risques dans la programmation des équipements et des changements institutionnels.

4) Le risque ne s'appuie pas sur la dichotomie de la raison et de la peur. Pas de peur : l'ozone irrite sans être une menace. Pas de rigidité de la raison : il ne répond pas plus à des règles et des seuils garantissant une protection absolue. Il demande à chacun d'adapter temporairement son comportement. L'ozone est matière pour une société à risques.

Récapitulation

BACHELARD a retracé une première transformation opérée au XIX^e siècle, celle d'une désensualisation pour la caractérisation de la matière, au rebours des définitions sensualistes du XVIII^e siècle, comme celle de ROUSSEAU dans *l'Emile* : « tout ce que je sens hors de moi, et qui agit sur mes sens, je l'appelle matière ».

L'histoire de l'ozone illustre deux autres remises en cause. Au XIX^e siècle, la matière sensible perd son monopole de la mesurabilité. Des quantités tenues ou immatérielles, des phénomènes biologiques et sociaux variables sont mesurables. Puis, avec GIBBS et BOREL, la mesure reste seule accessible, alors que l'élément dernier ne l'est plus. Pour prendre mesure, il faut se défaire de l'intuition géométrique. On ne peut

plus avoir qu'une relation guidée par les formalismes et contre-intuitive avec la matière.

Le XX^e siècle ne présente pas une définition unifiée de la mesure. Sciences et technologies font coexister des grands types de définition de la mesure, comme celle de la comparaison à une unité, celle d'une graduation, celle d'une probabilité. A travers les notions de risque et de probabilité, la matière ne respecte plus les cadastres. Pour BACHELARD, seules les surprises de l'objet forment l'approfondissement de la pensée. Le contexte contemporain est celui d'une démocratisation de ces surprises de l'objet, et par conséquent, d'un approfondissement généralisé.

Mots-clés

Ozone ; Mesure ; Histoire ; Épistémologie.

Keys-words

Ozone ; Measurement ; History ; Epistemology.

Références citées sur l'histoire de l'ozone (ouvrages classés chronologiquement)

[1856] SCOUTETTEN H. *L'ozone ou recherches chimiques, météorologiques, physiologiques et médicales sur l'oxygène électrisé*, Metz.

[1860] NAQUET A. *De l'allotropie et de l'isométrie*, Paris.

[1877] [1878] [1882] *Annuaire de l'Observatoire de Montsouris pour l'an 1877 (1878) (1882)*. Météorologie, Agriculture, Hygiène, Paris, Gauthier-Villars.

[1881] HARTLEY. On the absorption of solar rays by the atmospheric ozone, *Journal of Chemical Society*, 39, p.111.

[1883] NAQUET A. *Principes de chimie fondée sur les théories modernes*, 4^e. éd., Paris.

[1930] FABRY C., BUISSON H. *L'absorption des radiations dans la haute atmosphère*, Paris.

[1935] FABRY C. *Physique et astrophysique*, Paris, Flammarion.

[1952] HAAGEN-SMIT A.-J. Chemistry and Physiology of L.A. Smog, *Indust. Eng. Chem.*, 44.

[1953] BACHELARD G. *Le matérialisme rationnel*, Paris.

[1968] *Actes du 10^e Symposium sur l'ozone atmosphérique*, Monaco.

[1988] VOLZ A. et KLEY D. Evaluation of the Montsouris Series of Ozone Measurements made at the Nineteenth Century, *Nature*, 332, pp. 240-242.

[1993] Académie des Sciences. *Ozone et propriétés oxydantes de la troposphère*, Paris.

[1995] Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Energie. Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, *La Pollution automobile et ses effets sur la santé. Etat des connaissances. Interrogations et propositions*, Paris.

[1996] Conseil Supérieur d'Hygiène publique de France. *L'ozone, indicateur majeur de la pollution photochimique en France: évaluation et gestion du risque sur la santé*, Paris.

Les dates entre crochets renvoient aux références d'ouvrages.