

UMR ADEF

JOURNAL DU SEMINAIRE TAD/IDD

Théorie Anthropologique du Didactique
& Ingénierie Didactique du Développement

Non ridere, non lugere, neque detestari, sed intellegere. Baruch Spinoza (1632-1677)

Le lendemain, Aymery prit la ville. Victor Hugo (1802-1885)

Le séminaire TAD & IDD, animé par Yves Chevallard, a une double ambition solidaire : d'une part, il vise à mettre en débat des recherches (achevées, en cours ou en projet) touchant à la TAD ou, dans ce cadre, à des problèmes d'ingénierie didactique du développement, quel qu'en soit le cadre institutionnel ; d'autre part, il vise à faire émerger les problèmes de tous ordres touchant au développement didactique des institutions, et notamment des professions de professeur, de formateur et de chercheur en didactique. Deux domaines de recherche sont au cœur du séminaire : un domaine en émergence, la didactique de l'enquête codisciplinaire ; un domaine en devenir, la didactique des praxéologies mathématiques.

La conduite des séances et leur suivi se fixent notamment pour objectif d'aider les participants à étendre et à approfondir leur connaissance théorique et leur maîtrise pratique de la TAD et des outils de divers ordres que cette théorie apporte ou permet d'élaborer. Sauf exception, les séances se déroulent le vendredi après-midi, de 16 h 30 à 18 h 30, la séance pouvant être suivie à distance par visioconférence.

→ Séance 7 – Vendredi 12 juillet 2013

ANALYSES PRAXÉOLOGIQUES : ESQUISSE D'UN EXEMPLE

1. Amorces d'une enquête praxéologique

a) Dans ce qui suit, je voudrais, sur un cas particulier, commencer à illustrer les notions croisées d'enquête, d'analyse et de modèle praxéologiques. Le schéma que le chercheur en didactique ξ doit mettre en œuvre dans une enquête praxéologique a été précisé lors de la séance précédente du séminaire : supposant désignée une certaine entité praxéologique \wp , on veut élaborer un *modèle praxéologique de référence* (MPR) de \wp , soit $\mu(\wp)$. Plus justement, on élabore une *suite* de tels modèles, $\mu_0(\wp)$, $\mu_1(\wp)$, $\mu_2(\wp)$, ..., en fonction des besoins des études et recherches envisagées. Une telle suite, toujours finie, est aussi toujours indéfinie, à continuer.

① La suite des modèles $\mu_i(\wp)$ doit apporter une réponse à un système de questions de base :

Dans quelles institutions I l'entité \wp vit-elle ? Comment une telle institution I définit-elle \wp ? Quels usages en fait-elle ? En quelles positions au sein de I a-t-on à connaître de \wp ? Selon quels rapports institutionnels ? Quels problèmes sont posés au sein de I à propos de \wp ? Quels problèmes y sont ignorés ? Etc.

On voit d'emblée que la problématique du chercheur ξ est différente de celle du professeur y de \wp et, plus généralement, de celle d'un « spécialiste » non didacticien de \wp . Eux ne se demandent pas, en général, comment telle institution I définit l'entité \wp ; ils définissent l'entité \wp : « On appelle *mole*... » Là où le professeur *sait* ou, du moins, est contraint de *feindre de savoir* et de se persuader – et de persuader autrui – qu'il *sait*, le chercheur en didactique ξ , lui, *cherche à savoir* – indéfiniment. Semblable à un ethnologue étudiant une culture qui n'est pas la sienne, ou, plus exactement, dont il se met systématiquement à distance, ξ interroge le monde, avec lequel il se situe en permanence dans une tension *procognitive*. Notons en passant le rôle joué ordinairement par le pronom personnel indéfini *on*, usité pour exprimer une « vérité » censée être universelle, coup de force que nous interpréterons chaque fois en référant – explicitement ou, plus souvent, implicitement – le *on* utilisé à l'*institution* qui se désigne ainsi.

② La construction (ou, ici, l'esquisse) d'un MPR $\mu(\wp)$ d'une entité praxéologique \wp ne saurait guère être reçue sans malentendu par une personne x qui se penserait comme « maîtrisant \wp » – du point de vue de tel ou tel couple institutionnel $(I ; p)$. C'est ainsi que nombre de notations parmi celles qui suivront apparaîtront à une telle personne x comme presque insupportablement naïves, mal informées ou sous-informées (« Mais ça, on le sait ! »), tandis que d'autres, qui sortent du périmètre de sa « science de \wp », c'est-à-dire de son équipement praxéologique, seront déclarées inutiles, sans intérêt, etc. (« Ridicule ! Ça ne sert à rien », « C'est du baratin ! »). On reconnaîtra même un MPR didacticien authentique (qui n'est pas la copie du « savoir de \wp » de tel autre « spécialiste » de \wp) au malaise, à la gêne – d'un type ou d'un autre – qu'il provoque chez un prétendu « sachant ».

③ En sens inverse, le didacticien ξ devra assumer hardiment (c'est-à-dire « courageusement, avec assurance », « librement, sans hésiter », « sans crainte de se tromper », pour suivre ici le *TLFi*) le MPR $\mu(\wp)$ qu'il utilise spécifiquement (et que, souvent, il aura construit ou reconstruit) face aux modèles allogènes manipulés par les « spécialistes » (en diverses institutions de l'enseignement et de la recherche notamment) de \wp , modèles que ce MPR doit permettre de modéliser de façon appropriée à la recherche conduite.

④ Quelles fonctions doit assumer le MPR $\mu(\wp)$? La fonction principale peut s'exprimer en termes de niveaux de codétermination didactique. Considérons

un système didactique $S(X; y; \wp)$. Ce système, on le sait, n'advient généralement qu'en bout de chaîne, après que de nombreuses décisions ont été prises – aux niveaux de la civilisation, de la société, de l'école, de la pédagogie, notamment. Toutes ces décisions ont créé des conditions que l'on dit, en TAD, didactiques *au sens large*. On sait aussi que le « souci didactique » en une société s'épuise souvent au moment d'aborder le niveau didactique *stricto sensu*, celui des systèmes didactiques : la pédagogie est à cet égard une frontière sur laquelle nos sociétés achoppent. L'analyse didactique que ξ se doit de réaliser du haut en bas de l'échelle de codétermination didactique vise en particulier, *en se plaçant « du point de vue » de \wp grâce au MPR $\mu(\wp)$* , à estimer la « distance » séparant x de \wp , en chaque point du parcours pédagogique construit par les conditions didactiques de tous niveaux créées pour, censément, conduire x vers \wp . Bien entendu, il se peut que le chemin suivi par x dessine une trajectoire qui jamais ne lui permettra d'« atteindre » \wp , c'est-à-dire de rencontrer l'enjeu didactique dans des conditions qui lui permettraient de l'étudier effectivement.

⑤ Lorsque le travail du didacticien ξ est soumis au fantasme épistémologique généralement associé à ce que désignent les notations $\hat{\partial}_\wp$ et ξ_\wp introduites lors de la séance précédente, le MPR $\mu(\wp)$ reste souvent non explicité : il est censé être porté en lui par ξ_\wp en tant que « spécialiste de \wp ». Par contraste, la constitution historique du champ $\vec{\partial}$ suppose *l'explication de cet implicite*, ce qui est une autre fonction décisive des MPR.

b) L'exemple que je développerai quelque peu dans ce qui suit est celui de la notion de *mole*, notion qui s'est introduite dans notre travail lors de la séance 6 de ce séminaire et que je noterai désormais, simplement, \wp . On supposera en outre que ξ a, à l'origine de son enquête, un rapport personnel *quasi vide* (par exemple parce qu'il aura été *vidé* des années auparavant) à l'objet \wp : $R(\xi ; \wp) \approx \emptyset$.

① Un tout premier geste, sans doute inhabituel chez les « spécialistes », que ξ peut alors accomplir dans l'enquête envisagée consistera à interroger des *dictionnaires généraux* – ce qui manifestera précisément l'extériorité primitive de ξ vis-à-vis des institutions « spécialistes » de \wp . Consultons ainsi, d'abord, le *TLFi*. Ce dictionnaire propose deux entrées *Mole*. La seconde renvoie à une « mycose du champignon de couche, causée par un champignon microscopique » (en ce cas, *mole* viendrait du latin des botanistes *mola* « meule »). Sur ce sujet, notre enquête s'arrêtera là. La première entrée, en revanche, semble la bonne. On en fera ici une lecture *inventoriante*. En voici le texte intégral :

MOLE¹, subst. fém.

CHIM., PHYS.

A. – Quantité de matière contenant un nombre de molécules égal au nombre d'atomes contenus dans 12 g de l'isotope de carbone ¹²C ; cette quantité s'exprime en grammes par un nombre égal à la masse moléculaire (d'apr. *Encyclop. Sc. Techn.* t. 2 1970, p.197 et t. 9 1973, p. 16). Synon. mod. de *molécule-gramme*. *On a vu que la théorie cinétique des gaz avait permis à Loschmidt de déterminer une valeur approximative du nombre de molécules contenues dans une molécule-gramme (ou mole), ou nombre d'Avogadro N (Hist. gén. sc., t. 3, vol. 2, 1964, p. 229).*

B. – Unité de quantité de matière dans le Système international d'unités. *La mole [symbole mol] est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires [atomes, molécules, ions, électrons, etc.] qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12 (Encyclop. Sc. Techn. t. 7 1972, p. 741).*

REM. Molalité, subst. fém. Nombre de moles d'un corps dissous contenu dans 1000 g de solvant. *La molalité m peut être évaluée à partir de la molarité M (Encyclop. Sc. Techn. t. 3 1970, p. 596).*

Prononc.: [mɔl]. Homon. *molle* (fém. de *mou*). **Étymol. et Hist.** 1903 (*J. Chim. Phys.*, p. 353). Abrév. de *molécule-gramme* (1931, *Lar. 20e*).

② Cette notice restitue la situation du mot « mole » *en français* ; c'est ainsi que la première apparition (imprimée) en français de *mole* aurait eu lieu en 1903. En même temps, la notice examinée situe le concept de *mole* par rapport à d'autres concepts : molécule, molécule-gramme, etc.

③ On peut tirer de là un certain nombre d'énoncés *conjecturaux* constitutifs de $\mu_0(\varphi)$. En notant ces énoncés E_0^i ($i = 1, 2, \dots$), on a ce qui suit :

E_0^1 . Le mot *mole* est un nom féminin : on parle d'*une* mole.

E_0^2 . La notion de *mole* relève de la chimie et de la physique.

E_0^3 . Une *mole* est une « quantité de matière ».

E_0^4 . Une *mole* contient « un nombre de molécules égal au nombre d'atomes contenus dans 12 g de l'isotope de carbone ¹²C ».

E_0^5 . Une *mole* « s'exprime en grammes par un nombre égal à la masse moléculaire » (1970, 1973).

E_0^6 . Ce qu'on nomme aujourd'hui *mole* a été désigné, autrefois (et encore en 1964), par le nom composé *molécule-gramme*.

E_0^7 . Le nombre de molécules contenues dans une *mole* est le *nombre d'Avogadro* noté *N* (1964).

E_0^8 . La *mole* (dont le symbole est alors *mol*) est l'unité de « quantité de matière » dans le Système international d'unités : c'est « la quantité de matière d'un

système contenant autant d'entités élémentaires [atomes, molécules, ions, électrons, etc.] qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12 ».

E₀⁹. On appelle *molalité* et on note *m* le « nombre de moles d'un corps dissous contenu dans 1000 g de solvant ».

E₀¹⁰. « La *molalité* *m* peut être évaluée à partir de la *molarité* *M*. »

④ Ces énoncés conjecturaux soulèvent de multiples questions, elles-mêmes provisoires, qu'on énoncera sans les organiser (quoique en les numérotant) :

Q₁. Peut-on définir autrement qu'à l'aide de la notion de *mole* une « quantité de matière » ? Comment le faisait-on *avant* l'émergence de cette notion et en particulier lorsque la structure moléculaire de la matière n'était pas universellement acceptée par les chimistes et les physiciens ?

Q₂. Qu'est-ce que « l'isotope de carbone ¹²C » ? Et que vaut le « nombre d'atomes contenus dans 12 g de l'isotope de carbone ¹²C » ? Comment le connaît-on ? Est-ce bien ce qui est appelé « nombre d'Avogadro », *N* ?

Q₃. Qu'est-ce que la « masse moléculaire » ? Et pourquoi est-ce qu'une mole « s'exprime en grammes par un nombre égal à la masse moléculaire » ?

Q₄. Pourquoi parlait-on autrefois de *molécule-gramme* et pourquoi s'est-on mis à parler de *mole* ? Ces deux notions sont-elles vraiment identiques ?

Q₅. Pourquoi parle-t-on de nombre d'Avogadro ? Qui était Avogadro ? Comment détermine-t-on ce nombre ? Quel est ce nombre ?

Q₆. Pourquoi et comment la *mole* est-elle devenue une unité du Système international d'unités ?

Q₇. Qu'est-ce que la *molarité* ? Que peut-on dire de l'usage des mots *molalité* et *molarité* ? Sont-ils « importants » ?

c) Dans l'enquête ainsi amorcée, on peut choisir d'enquêter maintenant sur telle ou telle des questions Q₁ à Q₇, ce qui conduirait à plus ou moins brève échéance à faire une lecture *questionnante* d'exposés supposés *a priori* susceptibles de contenir des éléments de réponse aux questions étudiées ; ou, laissant alors ces questions *en attente*, on peut poursuivre la lecture *inventoriante* de divers exposés, ce qui, au reste, permettra peut-être à ξ de *refermer* (provisoirement) certaines au moins des questions formulées ci-dessus.

① Nous choisissons ici le deuxième parti, en l'espèce en examinant ce qu'il en est *en anglais* du mot *mole*. En vérité, ce mot y a (au moins) *quatre* acceptions : il désigne un *grain de beauté*, une *taupe*, un *môle* et une *mole*. Le *Online Etymology Dictionary* a ainsi les quatre entrées suivantes :

mole (n.1)

spot on skin, Old English *mal* “spot, mark, blemish,” especially on cloth or linen, from Proto-Germanic **mailan* “spot, mark” (cf. Old High German *meil*, German *Mal*, Gothic *mail* “wrinkle”), from PIE root **mai-* “to stain, defile” (cf. Greek *miainein* “to stain, defile,” see *miasma*). Specifically of dark marks on human skin from late 14c.

mole (n.2)

type of small burrowing mammal (*Talpa europea*), mid-14c., probably from obsolete *moldwarp*, literally “earth-thrower.” Spy sense first recorded 1974 in John le Carré (but suggested from early 20c.), from notion of “burrowing.” Metaphoric use for “one who works in darkness” is from c.1600.

mole (n.3)

“breakwater,” 1540s, from Middle French *môle* “breakwater” (16c.), ultimately from Latin *moles* “mass, massive structure, barrier,” from PIE root **mo-* “to exert oneself” (cf. Greek *molos* “effort,” *molis* “hardly, scarcely,” German *mühen* “to tire,” *müde* “weary, tired;” Russian *majat'* “to fatigue, exhaust,” *maja* “hard work”).

mole (n.4)

unit of molecular quantity, 1902, from German *Mol* coined 1900 by German chemist Wilhelm Ostwald (1853-1912), short for *Molekül* (see *molecule*).

② L'« exposé » qui nous intéresse tient dans les deux dernières lignes, qui apportent quelques informations précieuses :

E₀¹¹. Le mot *mole* comme désignant une « unit of molecular quantity » s'introduit en anglais en 1902, comme adaptation de l'allemand *Mol*.

E₀¹². Le mot *Mol* apparaît en allemand en 1900, forgé par le chimiste Wilhelm Ostwald (1853-1912) par abréviation du mot *Molekül*.

Comme on l'aura vu, la notice relative à « mole (n.4) » contient un renvoi à l'entrée *molecule*, où on lit ceci :

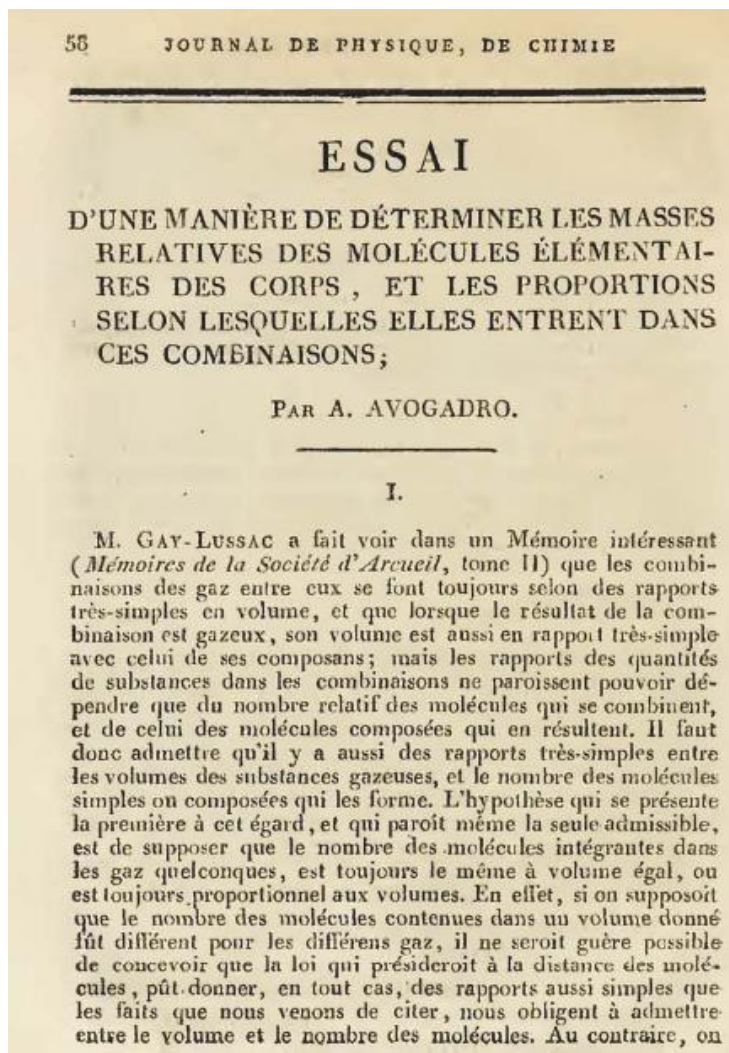
molecule (n.)

1794, “extremely minute particle,” from French *molécule* (1670s), from Modern Latin *molecula*, diminutive of Latin *moles* “mass, barrier” (see *mole* (3)). A vague meaning at first; the vogue for the word (used until late 18c. only in Latin form) can be traced to the philosophy of Descartes. First used of Modern Latin *molecula* in modern scientific sense by Amedeo Avogadro (1811).

③ On peut alors ajouter au modèle $\mu_0(\varphi)$ l'énoncé conjectural suivant :

E₀¹³. Le premier usage de « molécule » (ou du mot apparenté dans la langue utilisée) au sens scientifique moderne est dû à Amedeo Avogadro (1811).

④ Ici, une courte recherche sur Internet permet de voir que le mémoire d'Avogadro de 1811, publié dans le *Journal de physique, de chimie et d'histoire naturelle*, était en français (voir ci-après).



On voit aussi que le mot « molécule » y apparaît dès le titre. On peut ainsi ajouter l'énoncé suivant :

E₀¹⁴. Le mémoire de 1811 d'Amedeo Avogadro était intitulé *D'une manière de déterminer les masses relatives des molécules élémentaires des corps, et les proportions selon lesquelles elles entrent dans ces combinaisons*. Publié dans le *Journal de physique, de chimie et d'histoire naturelle*, il était rédigé en français.

Cela nous amène aussi à retoucher un peu l'un des énoncés précédents (sans changer sa numérotation) :

E₀¹³. Le premier usage de « molécule » au sens scientifique du terme serait dû à Amedeo Avogadro (1811), en français.

On trouve de larges extraits de l'article d'Avogadro dans le tome 1 (*Éléments et instruments*, pp. 126-129) de l'ouvrage *Introduction à l'histoire des sciences* dirigé par Georges Canguilhem (Hachette, 1970). L'article original se trouve à l'adresse http://www.bibnum.education.fr/files/AVOGADRO_MASSES_RELATIVES.pdf.

c) Complétons un peu le mince corpus des exposés précédents. On commencera avec la notice figurant à l'entrée « Molécule » du *Dictionnaire historique de la langue française* (1993), que l'on reproduit ci-après.

MOLÉCULE n. f. est emprunté (1674) au latin moderne *molecula*, attesté chez Gassendi (1592-1655), diminutif du latin *moles* « masse » (→ ① môle).

◆ *Molécule*, dont le sens primitif est celui de « très petite masse, minuscule partie d'un corps », a reçu une définition précise en chimie au début du XIX^e s. après la détermination du concept dynamique de masse et la formulation de l'hypothèse d'une limite à la divisibilité de la matière (Avogadro et Ampère). Le concept, essentiel, a évolué à mesure que la théorie atomique s'est construite et complexifiée (→ atome).

► **Moléculaire** adj. (1797) a évolué selon les valeurs de *molécule* et est entré dans des noms composés où le premier élément indique le nombre de molécules mises en cause. Il est devenu usuel en chimie dans la seconde moitié du XIX^e s. (*masse, poids moléculaire*) et s'est étendu au XX^e s. à la biologie, par exemple dans *biologie moléculaire* (v. 1950), *génétique moléculaire*... ◀► *Molécule* entre dans **Molécule-gramme** n. f. (1923 ; *gramme-molécule*, 1900) en chimie, qui a vieilli au profit de la forme abrégée ① **Mole** n. f. (1903), emprunt à l'allemand *Mol* (W. Ostwald, 1900), sur lequel ont été créés ② **Molaire** adj. (déb. XX^e s. ? ; l'anglais *molar* est attesté en 1902) et **Molarité** n. f.

① Notons que le *Online Etymology Dictionary* confirme l'indication relative à l'adjectif *molar* :

molar (adj.)

in chemistry, "pertaining to one mole," 1902, from *mole* (4) + *-ar*.

② Ajoutons à cela un extrait de la notice consacrée à l'entrée *mole* par le *Dictionary of Word Origins* (1990) de John Ayto. Après avoir indiqué que la langue anglaise possède quatre mots *mole* de sens distincts, l'auteur les présente un à un ; il écrit notamment :

Mole 'harbour wall' [16] comes via French *mole* and medieval Greek *mólos* from

latin *mōlēs*. The diminutive form of this, coined in modern times, is *mōlēcula*, from which, via French *molécule*, English gets *molecule* [18] [...] And German *mol*, a convenient shortening of *moleculargewicht* ‘molecular weight’ has given English its fourth *mole* [20], used as the basic unit of measurement for the amount of a substance.

③ Les indications précédentes conduisent à retoucher un autre énoncé :

E₀¹². Le mot *Mol* apparaît en allemand en 1900, forgé par le chimiste Wilhelm Ostwald (1853-1912) par abréviation du mot *Molekül* (ou de *Moleculargewicht* « poids moléculaire » ?).

2. Faisons le point et avançons

a) Dressons d’abord un bilan (provisoire) des énoncés constitutifs du modèle $\mu_0(\varphi)$:

E₀¹. Le mot *mole* est un nom féminin : on parle d’une mole.

E₀². La notion de *mole* relève de la chimie et de la physique.

E₀³. Une *mole* est une « quantité de matière ».

E₀⁴. Une *mole* contient « un nombre de molécules égal au nombre d’atomes contenus dans 12 g de l’isotope de carbone ¹²C ».

E₀⁵. Une *mole* « s’exprime en grammes par un nombre égal à la masse moléculaire » (1970, 1973).

E₀⁶. Ce qu’on nomme aujourd’hui *mole* a été désignée, autrefois (et encore en 1964), par le nom composé *molécule-gramme*.

E₀⁷. Le nombre de molécules contenues dans une *mole* est le *nombre d’Avogadro* noté *N* (1964).

E₀⁸. La *mole* (dont le symbole est alors *mol*) est l’unité de « quantité de matière » dans le Système international d’unités : c’est « la quantité de matière d’un système contenant autant d’entités élémentaires [atomes, molécules, ions, électrons, etc.] qu’il y a d’atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12 ».

E₀⁹. On appelle *molalité* et on note *m* le « nombre de moles d’un corps dissous contenu dans 1000 g de solvant ».

E₀¹⁰. « La *molalité m* peut être évaluée à partir de la *molarité M*. »

E₀¹¹. Le mot *mole* comme désignant une « unit of molecular quantity » s’introduit en anglais en 1902, comme adaptation de l’allemand *Mol*.

E₀¹². Le mot *Mol* apparaît en allemand en 1900, forgé par le chimiste Wilhelm Ostwald (1853-1912) par abréviation du mot *Molekül* (ou de *Moleculargewicht* « poids moléculaire » ?).

E₀¹³. Le premier usage de « molécule » au sens scientifique moderne est dû à Amedeo Avogadro (1811), en français.

E₀¹⁴. Le mémoire de 1811 d’Amedeo Avogadro était intitulé *D’une manière de*

déterminer les masses relatives des molécules élémentaires des corps, et les proportions selon lesquelles elles entrent dans ces combinaisons. Publié dans le *Journal de physique, de chimie et d'histoire naturelle*, il était rédigé en français.

① Aux questions déjà formulées, que l'on rappelle ci-après, on rajoute quelques questions nouvelles :

Q₁. Peut-on définir autrement qu'à l'aide de la notion de *mole* une « quantité de matière » ? Comment le faisait-on *avant* l'émergence de cette notion et en particulier lorsque la structure moléculaire de la matière n'était pas universellement acceptée par les chimistes et les physiciens ?

Q₂. Qu'est-ce que « l'isotope de carbone ¹²C » ? Et que vaut le « nombre d'atomes contenus dans 12 g de l'isotope de carbone ¹²C » ? Comment le connaît-on ? Est-ce bien ce qui est appelé « nombre d'Avogadro », *N* ?

Q₃. Qu'est-ce que la « masse moléculaire » ? Et pourquoi est-ce qu'une mole « s'exprime en grammes par un nombre égal à la masse moléculaire » ?

Q₄. Pourquoi parlait-on autrefois de *molécule-gramme* et pourquoi s'est-on mis à parler de *mole* ? Ces deux notions sont-elles vraiment identiques ?

Q₅. Pourquoi parle-t-on de nombre d'Avogadro ? Qui était Avogadro ? Comment détermine-t-on ce nombre ? Quel est ce nombre ?

Q₆. Pourquoi et comment la *mole* est-elle devenue une unité du Système international d'unités ?

Q₇. Qu'est-ce que la *molarité* ? Que peut-on dire de l'usage des mots *molalité* et *molarité* ? Sont-ils « importants » ?

Q₈. Qui a introduit en anglais en 1902 le mot *mole* (pour traduire l'allemand *Mol*) ?

Q₉. L'allemand *Mol* est-il une abréviation de *Molekül* ou de *Molekulargewicht* ?

Q₁₀. La *notion* de mole était-elle réellement présente dans l'article d'Avogadro de 1811 ? Si oui, sous quelle forme ?

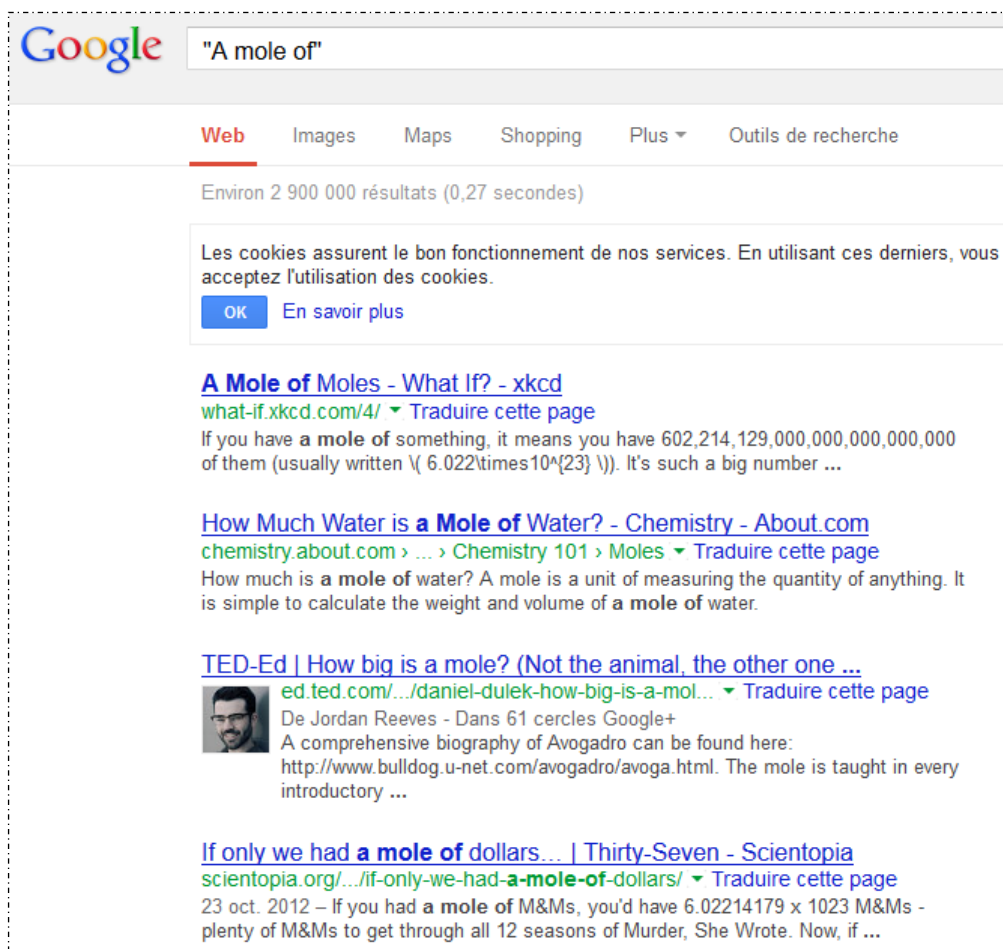
② Dans la notice dont nous sommes partis ci-dessus (à l'entrée « Mole » du *TLFi*), on ne rencontre jamais les expressions *mole de*, *moles de*, *mole d'*, *moles d'* (ni, en anglais, les expressions *mole of* ou *moles of*), hormis dans la définition de *molalité* – « nombre de *moles d'un corps dissous contenu dans 1000 g de solvant* ». En particulier, il n'y a nulle trace de la référence à un « corps » particulier. Ce fait est-il simplement le fruit de contraintes proprement lexicographiques (il s'agit de dictionnaires généraux, non de dictionnaires de chimie) ou y aurait-il là un *symptôme* d'autre chose ? Mais alors de quoi ? On peut formuler à cet égard au moins une autre question (à la fois naïve et positive) :

Q₁₁. Comment utilise-t-on le mot *mole* dans le discours de la chimie (en dehors des « définitions de dictionnaire ») ? Dans quelles tournures de phrase ce mot


apparaît-il ?

b) Il convient maintenant de poursuivre l'enquête.

① On pourrait bien sûr se lancer dans des enquêtes spéciales pour répondre aux questions recensées. Par exemple, à propos de la question Q_{11} , on peut demander au moteur de Google d'indiquer les documents qu'il a recensés comportant l'expression exacte "A mole of". Voici ce qu'on obtenait le 23 juin 2013 vers 10 h 15.



The screenshot shows a Google search interface with the query "A mole of". The search results are as follows:

- Web** | Images | Maps | Shopping | Plus ▾ | Outils de recherche
- Environ 2 900 000 résultats (0,27 secondes)
- Les cookies assurent le bon fonctionnement de nos services. En utilisant ces derniers, vous acceptez l'utilisation des cookies.
 [En savoir plus](#)
- [A Mole of Moles - What If? - xkcd](#)**
[what-if.xkcd.com/4/](#) ▾ Traduire cette page
If you have a **mole** of something, it means you have 602,214,129,000,000,000,000 of them (usually written $\{ 6.022 \times 10^{23} \}$). It's such a big number ...
- [How Much Water is a Mole of Water? - Chemistry - About.com](#)**
[chemistry.about.com](#) > ... > Chemistry 101 > Moles ▾ Traduire cette page
How much is a **mole** of water? A mole is a unit of measuring the quantity of anything. It is simple to calculate the weight and volume of a **mole** of water.
- [TED-Ed | How big is a mole? \(Not the animal, the other one ...](#)**
 [ed.ted.com/.../daniel-dulek-how-big-is-a-mol...](#) ▾ Traduire cette page
De Jordan Reeves - Dans 61 cercles Google+
A comprehensive biography of Avogadro can be found here:
<http://www.bulldog.u-net.com/avogadro/avoga.html>. The mole is taught in every introductory ...
- [If only we had a mole of dollars... | Thirty-Seven - Scientopia](#)**
[scientopia.org/.../if-only-we-had-a-mole-of-dollars/](#) ▾ Traduire cette page
23 oct. 2012 – If you had a **mole** of M&Ms, you'd have 6.02214179 x 10²³ M&Ms - plenty of M&Ms to get through all 12 seasons of Murder, She Wrote. Now, if ...

On notera que les indications rendues apparentes ici par le moteur de recherche permettent de formuler de nouveaux énoncés, par exemple quant au nombre d'Avogadro :

E_0^{15} . Le nombre d'Avogadro serait voisin de $6,02214129 \cdot 10^{23}$ ou de $6,02214179 \cdot 10^{23}$.

On peut en tirer aussi la conclusion (à vérifier !) que « it is simple to calculate the weight and volume of a mole of water »: conservons l'URL de la page ainsi repérée (<http://chemistry.about.com/od/moles/a/How-Much-Water-Is-A->

[Mole-Of-Water.htm](#)), nous y reviendrons peut-être plus tard. (Sur le sigle M&Ms qui apparaît sur la page de résultats de Google, voir l'article de même nom de *Wikipédia*.)

② On peut aussi demander au même moteur de recherche de nous faire connaître ce qu'il propose en réponse à la requête « Une mole de » :

[Mole \(unité\) - Wikipédia](#) 
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Mole_\(unité\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mole_(unité)) ▼
Pour donner un ordre de grandeur, **une mole de** secondes représenterait un peu ... **Une mole de** grains de maïs éclaté permettrait de recouvrir la surface des ...

[Atome, molécule et mole](#)
www.cdrummond.qc.ca/cegep/scnature/chimie/Mole/Mole.htm ▼
Une mole de divers composés. Élément, Nombre d'atomes, Masse de l'échantillon (g). Aluminium. 6,022 x 10²³. 26,98. Fer. 6,022 x 10²³. 55,85. Cuivre.

[La chimie.net | La mole \(définition, quantité, exemples\)](#)
www.lachimie.net/17.lamole.htm ▼
29 juil. 2012 – Nous pouvons peser, par-exemple, la masse d'**une mole de** sel de cuisine ... Mais on pourrait aussi dire, **une mole de** grains de riz, ce qui ...

[La mole](#)
www.lombardf.com/~jean-eloi/pri/2nd1/phy/mole.html ▼
1) photo p.107 : on a chaque fois **une mole de** différentes espèces chimiques donc chaque fois un même nombre de particules, mais une masse et un volume ...

[Définition > Mole - Futura-Sciences](#)
www.futura-sciences.com/fr/definition/t/physique-2/d/mole_358/ ▼
Exemple: **une mole de** molécules de dihydrogène est un ensemble de 6,022 x 10²³ molécules de dihydrogène. Aucun commentaire Soyez le premier à réagir ...

[QUANTITE DE MATIERE EN MOLE](#)
mdmaths.voila.net/Chimie/site/lamole/quantite.htm ▼
Une mole de molécules d'eau contient N molécules d'eau. Une mole ... La masse molaire moléculaire M est la masse d'**une mole de** molécules. Sa valeur est ...

[mole](#)
aelanzi.free.fr/mole.htm ▼
Dans **une mole de** molécule d'eau, il y a 6,022.10²³ molécules d'eau. Dans une mole ... Ainsi, **une mole de** particules(atomes, molécules, ions ...) est une ...

[la mole seconde sciences physiques](#)
www.lyc-perier.ac-aix-marseille.fr/exovideo/cours.../5_la_mole.htm ▼
Calculer la masse d'**une mole de** nucléons (masse d'un nucléon m = 1,67x10⁻²⁷ kg). Réponse vidéo. 1.3. La constante d'Avogadro : Vidéo. Exemple ::

On peut là encore tirer quelques conclusions (toujours conjecturales), par exemple celle-ci :

E₀¹⁶. D'aucuns, dans l'enseignement ou la vulgarisation, parlent non seulement de moles d'eau, de sel de cuisine, de dihydrogène, de nucléons, mais aussi de « secondes » (la durée de temps) ou de « grains de maïs éclaté », ce qui ne relève pas de façon évidente de la chimie.

À cela, on peut attacher une question encore :

Q₁₂. Pourquoi certains exposés sur la notion de mole font-ils référence à des moles d'entités autres que les « entités élémentaires [atomes, molécules, ions, électrons, etc.] » évoquées en relation avec le système international d'unités ? Est-ce là le symptôme d'une difficulté caractérisée ? Si oui, laquelle ?

c) Nous poursuivrons cependant notre enquête en examinant un petit nombre d'exposés dont nous ferons encore une lecture inventoriante. Comme il s'agit de construire un modèle praxéologique de référence *pour le didacticien*, il n'est pas déraisonnable de s'orienter, quoique sans exclusive, vers des exposés d'enseignement ou de vulgarisation.

① Sans aborder encore la littérature des manuels scolaires (nous le ferons à la rentrée), je prendrai le cas d'un ouvrage parascolaire, le *Larousse du Bac* (Larousse, 1992). On peut s'attendre à y trouver une certaine *doxa* scolaire – si du moins cette *doxa* a eu le temps de décanter et de se stabiliser (ce qui paraît vraisemblable). L'ouvrage comporte une entrée « Mole », que je reproduis *in extenso* :

Mole n. f.

□ CHIM. C'est l'unité légale de quantité de matière ; son symbole est mol. L'échelle atomique ou moléculaire est extrêmement petite (de l'ordre du nanomètre au point de vue des dimensions et de l'ordre de 10^{-22} g pour la masse), aussi la quasi-totalité des raisonnements en chimie se font-ils sur un très grand nombre de particules identiques (atomes, molécules, ions, électrons) pour que les masses considérées correspondent à notre échelle macroscopique. Ce très grand nombre est la mole, qui correspond à la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités qu'il y a d'atomes de carbone dans 12,0 g de carbone 12 (isotope 12), c'est-à-dire $6,022\ 04 \times 10^{23}$ (VOIR *Constante d'Avogadro**).

Ainsi, une mole d'ions cuivre II correspond à $6,022\ 04 \times 10^{23}$ ions cuivre II.

② On notera que cet exposé énonce que « ce très grand nombre est la mole ». Or la mole est l'unité (légale) de quantité de matière ; donc la mole est une quantité de matière (comme le mètre est une longueur). Comment la mole peut-elle être aussi un nombre ? De là la question suivante :

Q₁₃. La mole est-elle un nombre ou une « quantité de matière » ? Pourquoi ?

③ Par ailleurs, il semble que la notion de « quantité de matière » ait ici (et dans tout ce qu'on a vu d'ailleurs) le statut de notion *primitive*, non définie.

Contrairement par exemple à l'expression « Quantité de mouvement », qui fait l'objet d'une longue notice dans le *Larousse du Bac*, l'expression « Quantité de matière », qui est bien une entrée de cet ouvrage, voit son explicitation réduite à ceci :

Quantité de matière

☐ CHIM. VOIR *Mole**.

On a donc la question suivante :

Q₁₄. Quel est le statut de la notion de *quantité de matière* dans la définition de la mole ?

④ Passons alors, toujours dans le *Larousse du Bac*, à l'entrée « Constante d'Avogadro » :

Avogadro, constante d'Avogadro

☐ CHIM. Avogadro est un chimiste italien (1776-1856) qui a réalisé de nombreux travaux sur les molécules.

La constante (symbolisée par N) vaut $6,022\ 04 \times 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$; elle correspond au nombre d'atomes de carbone (isotope 12) contenu dans une masse de 12 g, soit une mole (symbole mol). Ainsi, la masse atomique molaire du carbone est $12\ \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$; une mole d'entités (atome, molécule, ion) correspond à $6,022\ 04 \times 10^{23}$ entités.

Cette notice peut donner le tournis ! Tout d'abord, elle donne le nombre d'Avogadro égal à $6,022\ 04 \times 10^{23}$, là où d'autres donnent $6,022\ 14 \times 10^{23}$. Ce nombre, quel qu'il soit, est une grandeur *sans dimension*. La *constante* d'Avogadro, elle, est présentée comme valant $6,022\ 04 \times 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$, grandeur dont la dimension est *l'inverse* de la quantité de matière. Par ailleurs, le texte examiné semble identifier le « nombre d'atomes de carbone (isotope 12) contenu dans une masse de 12 g » avec *une mole* ! On aura noté par ailleurs l'usage, non seulement du mot générique « entité », mais encore du verbe *correspondre* : la constante d'Avogadro *correspond* à un nombre d'atomes ; une mole d'entités *correspond* à $6,022\ 04 \times 10^{23}$ entités. D'où ces questions :

Q₁₅. Peut-on dire qu'une mole d'entités n'est pas autre chose que $6,022\ 04 \times 10^{23}$ de ces entités ?

Q₁₆. Pourquoi définit-on la *constante* [d'Avogadro] N comme ayant la dimension N^{-1} , où N est la dimension de la quantité de matière ?

S'agissant du symbole N, la brochure *Le système international d'unités* (http://www.bipm.org/utis/common/pdf/si_brochure_8_fr.pdf) présente, p. 15, le tableau suivant :

Grandeurs de base et dimensions utilisées avec le SI

Grandeur de base	Symbole de la grandeur	Symbole de la dimension
longueur	$l, x, r, \text{etc.}$	L
masse	m	M
temps, durée	t	T
courant électrique	I, i	I
température thermodynamique	T	Θ
quantité de matière	n	N
intensité lumineuse	I_v	J

⑤ Tout cela semble être un symptôme qu'il y aurait là une *difficulté conceptuelle* – du moins si l'on croit, avec Boileau, que « ce que l'on conçoit bien s'énonce clairement » et que « les mots pour le dire arrivent aisément »...

d) On s'arrête maintenant sur un livre déjà mentionné lors de la séance 6 de ce séminaire : le livre de Paul Depovere intitulé *Oh, la chimie !* (Dunod, 2008), dont on a reproduit ci-après l'exposé principal sur la notion de mole :

Chacun sait sans doute que :

- **2** objets formant un ensemble constituent une *paire* (telle une paire de chaussettes) ;
- **12** objets de même nature (par exemple des œufs) constituent une *douzaine* ;
- **25** feuilles de papier correspondent à une *main* (qui n'a rien à voir avec l'organe de la préhension).

Mais il faut savoir aussi que :

- 12 douzaines de certaines marchandises (donc **144** objets, tels par exemple des boutons) s'appellent une *grosse* (d'où le mot grossiste pour le marchand en gros) ;
- 20 mains de 25 feuilles de papier (soit **500** feuilles de papier) se vendent sous le nom de *rame* (rien à voir avec une rame de métro !).

En chimie, **602 210 000 000 000 000 000 000** (c'est-à-dire **$6,0221 \times 10^{23}$**) entités (atomes, molécules...) constituent une *mole* (symbole : mol) desdites entités. Cette unité de quantité chimique – qui équivaut à la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kg de carbone 12 – présente plusieurs facettes : elle fait

référence à un nombre très élevé d'entités mais aussi à une masse ou à un volume. La mole est l'une des sept unités de base du système international d'unités (SI), avec le mètre (m), le kilogramme (kg), la seconde (s), l'ampère (A), le kelvin (K) et la candela (cd) ; ce mot ne doit pas être confondu avec « môle » qui se prononce d'ailleurs différemment. La mole permet de passer de l'infiniment petit – que sont les atomes et les molécules – à l'échelle macroscopique des manipulations chimiques. Quant au nombre $6,0221 \times 10^{23}$, il est appelé, lorsqu'on l'exprime en mol : la *constante d'Avogadro* en hommage au brillant chimiste italien, le comte Amedeo Avogadro di Quaregna, qui émit l'hypothèse selon laquelle des volumes égaux de gaz différents contiennent, à la même température et à la même pression, le même nombre de molécules.

Diverses analogies ont été décrites pour faire comprendre le caractère gigantesque de ce nombre d'entités contenues dans une mole. On retiendra en pratique que lorsqu'on exprime la masse atomique d'un élément quelconque en grammes, on obtient de fait la masse d'une mole d'atomes de l'élément considéré. Cette notion peut être étendue au cas des molécules. En additionnant les masses atomiques de chacun des atomes dont une molécule est constituée, on obtient la *masse molaire moléculaire* de celle-ci. (pp. 23-25)

① Je noterai d'abord 7 énoncés et 8 questions qu'engendre la lecture de la *deuxième* partie de ce passage (qui commence par « En chimie, ... ») :

Énoncés

E₀¹⁷. « 602 210 000 000 000 000 000 000 (c'est-à-dire $6,0221 \times 10^{23}$) entités (atomes, molécules...) constituent une *mole* (symbole : mol) desdites entités. »

E₀¹⁸. La mole est une « unité de quantité chimique ».

E₀¹⁹. La mole « fait référence à un nombre très élevé d'entités mais aussi à une masse ou à un volume ».

E₀²⁰. « La mole est l'une des sept unités de base du système international d'unités (SI), avec le mètre (m), le kilogramme (kg), la seconde (s), l'ampère (A), le kelvin (K) et la candela (cd) »

E₀²¹. « La mole permet de passer de l'infiniment petit – que sont les atomes et les molécules – à l'échelle macroscopique des manipulations chimiques ».

E₀²². « Lorsqu'on exprime la masse atomique d'un élément quelconque en grammes, on obtient de fait la masse d'une mole d'atomes de l'élément considéré. »

E₀²³. « En additionnant les masses atomiques de chacun des atomes dont une molécule est constituée, on obtient la *masse molaire moléculaire* de celle-ci. »

Questions

Q₁₇. Quand on parle de « quantité chimique », doit-on entendre cette expression par contraste avec une notion de « quantité physique » ?

Qu'entend-on alors par là ? Et en quoi peut-on affirmer que la mole « fait référence [...] à une masse ou à un volume » (regardées sans doute, elles, comme des grandeurs « physiques » plutôt que « chimiques ») ?

Q₁₈. Depuis quand la mole est-elle l'une des sept unités de base du système international d'unités (SI) ?

Q₁₉. En quoi peut-on dire que « la mole permet de passer de l'infiniment petit [...] à l'échelle macroscopique des manipulations chimiques » ?

Q₂₀. Qu'est-ce qui peut expliquer une tournure de phrase aussi entortillée que celle-ci : « Quant au nombre $6,0221 \times 10^{23}$, il est appelé, lorsqu'on l'exprime en mol : la *constante d'Avogadro*... » ?

Q₂₁. Quel lien existe-t-il entre « l'hypothèse [d'Avogadro] selon laquelle des volumes égaux de gaz différents contiennent, à la même température et à la même pression, le même nombre de molécules », d'une part, et la définition ou les usages de la notion de mole, d'autre part ?

Q₂₂. Comment définit-on la notion de *masse atomique* ?

Q₂₃. Comment définit-on la notion de *masse molaire moléculaire* ?

Q₂₄. Pourquoi est-ce que, lorsqu'on exprime la masse atomique d'un élément quelconque en grammes, on obtient de fait la masse d'une mole d'atomes de l'élément considéré ?

② L'exposé de Paul Depovere use d'une technique didactique consistant à présenter le substantif « mole » comme entrant dans une série de substantifs « communs » désignant chacun une *cardinalité déterminée* : *paire, douzaine, grosse, main, rame*. Notons toutefois que le mot *paire* désigne en principe, en français courant, la « réunion de deux choses, symétriques ou identiques, destinées à être utilisées ensemble » (TLFi) : une paire de chaussettes ne désigne pas un ensemble de deux chaussettes *en général*, comme chacun le sait. Il existait en français, autrefois, une expression idoine : on parlait d'*une couple*. Le TLFi donne de cet usage les exemples suivants : « Six oboles, prix d'une couple de colombes » (Chateaubriand), « Une couple d'œufs. Une couple de chapons » (Académie française), « "Amour" paraîtra, [...] dans les environs d'avril, [...] Il y manque encore une couple de cent vers » (Verlaine), « Mon indisposition, quoique fréquente, ne dure jamais plus d'une couple d'heures, trois tout au plus » (Barrès). On dit (encore) en anglais « a couple of hours » ; et le dictionnaire en ligne Macmillan donne ces exemples : « A couple of police officers were standing at the door », « Take a couple of aspirin—you'll soon feel better ». Il est vrai que, comme on le sait ou comme on le vérifiera, *paire* a, en mathématiques, aujourd'hui, le sens d'ensemble de cardinal 2 (de 2-emble) tandis que *couple* (au masculin) a un sens différent.

③ Avant de poursuivre, je reproduis un passage de mon séminaire destiné aux professeurs stagiaires de mathématiques de l'année 2001-2002. Ce

passage commence par une question formulée par l'une des professeurs stagiaires de cette année-là et continue par un développement qui nous intéresse au premier chef ici :

Je suis en train de faire le chapitre sur les nombres en écriture fractionnaire. Je leur ai donné quelques petits problèmes. Les élèves ont eu du mal à comprendre pourquoi si, par exemple, l'énoncé parle des « trois quarts de 2700 élèves » on doit faire $\frac{3}{4} \times 2700$. Je leur ai expliqué de différentes façons, mais certains n'y arrivent pas. Quelle méthode aurait été plus efficace ? (LC, CR, 4^e, 13)

① La théorie des grandeurs évoquée jusqu'ici s'applique implicitement aux espèces de grandeurs « *discrètes* », dont les mesures sont *a priori* regardées comme *entières*.

❶ Soit E un ensemble (potentiellement) infini et X l'ensemble des parties finies de E . Sur X est définie une espèce de grandeur \mathcal{G} qu'on peut appeler la « *numérosité* », ou la « *nombrosité* », ou la *cardinalité*, ou, simplement (mais de manière un peu gauche au plan de la langue), la *quantité* d'un ensemble fini $x \in X$. Une grandeur $g \in \mathcal{G}$ est une certaine « *numérosité* » (ou *cardinalité*), et sa mesure $n \in \mathbb{N}$ est le *cardinal* de tout ensemble $x \in X$ de numérosité g . Un tel schéma peut paraître subtil, parce que la conceptualisation courante portée par le langage ordinaire gomme quelque peu la distinction pourtant indispensable entre la grandeur (la numérosité, la quantité, la cardinalité) et sa mesure (le cardinal).

❷ Selon que l'on prend pour E l'ensemble de toutes les *personnes*, ou l'ensemble de tous les *bonbons*, ou l'ensemble de tous les *billes*, on obtient des espèces de grandeurs différentes : l'expression « 3 billes » désigne, non tel ou tel ensemble de billes de cardinal 3, mais une numérosité possible d'un ensemble fini de billes ; et il en va de manière analogue de « 8 bonbons » ou de « 2700 personnes ». Les mots « *bille* », « *bonbon* », « *personne* » désignent ici des *unités*, et non *telle* personne, *tel* bonbon, *telle* bille.

❸ Comme dans le cas continu, on peut, dans le cas discret, prendre pour grandeur unité de la numérosité d'ensembles $x \in X = \mathcal{P}(E)$ une autre numérosité que la grandeur $u = \text{personne, bonbon, bille, etc.}$, c'est-à-dire autres que ce que les anciens manuels d'arithmétique appelaient *l'unité simple* : on compte aussi « *par six* », « *par dizaine* », « *à la douzaine* », « *par centaine* », etc., ce qui revient à prendre pour unité $v = 6 u, 10 u, 12 u, 100 u$, etc.

❹ Dans un tel cas, la *mesure* de la cardinalité considérée peut ne pas être entière, et on doit alors recourir aux nombres « *fractionnaires* ». On aura ainsi : 67 personnes = $\frac{67}{12}$ douzaines de personnes. L'écriture traditionnelle

était en fait (et continue d'être, dans les pays anglo-saxons) : 67 personnes = $5 \frac{7}{12}$ douzaines de personnes, où l'écriture $5 \frac{7}{12}$ désigne le nombre $5 + \frac{7}{12}$.

② L'expression « 2700 personnes » ne dénote nullement un *ensemble* de personnes, mais bien une certaine grandeur, qui est ici une cardinalité, celle de tout ensemble de personnes de cardinal 2700.

❶ En notant u l'unité « personne », on a alors par exemple : $\frac{3}{4} (2700 u) = \left(\frac{3}{4} \times 2700\right) u = 3 \times \frac{2700}{4} u = 3 \times 675 u = 2025 u$. On peut écrire si l'on veut : $\frac{3}{4} (2700 \text{ personnes}) = \dots = 2025 \text{ personnes}$, ou même : $\frac{3}{4} (2700 \text{ p}) = \dots = 2025 \text{ p}$.

On aura de même : $\frac{5}{12} (2700 \text{ personnes}) = \left(\frac{5}{12} \times 2700\right) \text{ personnes} = 1125 \text{ personnes}$. Ou même : $\frac{5}{7} (2700 \text{ personnes}) = \left(\frac{5}{7} \times 2700\right) \text{ personnes} = \left(1928 + \frac{4}{7}\right) \text{ personnes}$.

❷ Soulignons encore qu'on ne doit pas s'abuser – et abuser les élèves – en confondant l'objet $x \in X = \mathcal{P}(E)$ avec ce qui est en fait *une* grandeur \tilde{x} de cet objet. Dans un autre contexte social, pour le même ensemble $X = \mathcal{P}(E)$ des ensembles finis de personnes, on pourra par exemple considérer, non la numérosité \tilde{x} de $x \in X$, mais le poids total \tilde{x} de l'ensemble de personnes x , sans qu'il y ait une relation simple entre \tilde{x} et \tilde{x} (on pourra songer ici à certains ascenseurs...).

④ M'appuyant sur une observation du *Online Etymology Dictionary*, à l'entrée « Dozen », selon laquelle « the Old French fem. suffix *-aine* is characteristically added to cardinals to form collectives in a precise sense (“exactly 12,” not “about 12”) », je propose de parler plaisamment de *n-aine* [$\varepsilon n \varepsilon n$] pour tout entier $n \in \mathbb{N}$, en désignant par là une grandeur de l'espèce « numérosité » (ou « cardinalité »), qu'il est loisible de choisir en guise d'*unité* de cardinalité (ou numérosité). Une rame serait alors une 500-aine, une main une 25-aine ; enfin une mole serait une n_A -aine où n_A serait le « nombre d'Avogadro » (à distinguer de la *constante* d'Avogadro $N_A = n_A \text{ mol}^{-1}$). Cela permet de poser une question importante :

Q₂₅. Pourquoi a-t-on choisi comme « unité de quantité numérique », sous le nom de *mole*, la n_A -aine, où n_A est le « nombre d'Avogadro » ? Autrement dit : pourquoi n_A ?

⑤ L'ouvrage dont nous avons examiné un extrait comporte un glossaire, dont on peut extraire ceci :

Masse atomique. Masse d'un atome élémentaire donné, compte tenu de la

composition isotopique habituelle de celui-ci et ce, par rapport au douzième de la masse de l'isotope 12 du carbone.

Masse molaire moléculaire. Masse d'une mole de molécules déterminées, qui se calcule en pratique en faisant la somme des masses atomiques (exprimées en grammes) des divers atomes constitutifs.

.....
Molalité. C'est, pour une solution, la concentration exprimée en nombre de moles de soluté par kilogramme de solvant.

Molarité. C'est, pour une solution, la concentration exprimée en nombre de moles de soluté par litre de ladite solution.

Mole. Quantité de matière contenant autant d'entités (atomes, molécules etc.) qu'il y a d'atomes dans 0,012 kg de carbone 12. (p. 216)

⑥ Nous utiliserons ces « définitions » quelque peu elliptiques (et qu'il conviendra d'élucider) pour tenter d'effectuer la tâche proposée par Paul Depovere, sur laquelle nous nous sommes arrêtés sans nous y attarder lors de la séance 6 du séminaire :

En se basant sur les paramètres intrinsèques des atomes, à savoir le nombre de protons, de neutrons et d'électrons qu'ils contiennent, il est possible, connaissant la masse individuelle de ces particules fondamentales, de calculer la masse d'un seul atome déterminé. Sachant par ailleurs que la masse d'une mole de ces atomes n'est rien d'autre que la masse atomique ad hoc exprimée en grammes, il est très aisé de calculer le nombre d'atomes qu'il y a dans une mole de ceux-ci.

Ainsi, dans le cas de l'isotope $^{208}_{82}\text{Pb}$, chaque atome contient 82 protons (dont la masse est $1,6726231 \times 10^{-24}$ g), 82 électrons (dont la masse est $9,1093897 \times 10^{-28}$ g) et $(208 - 82)$, c'est-à-dire 126 neutrons (dont la masse est $1,6749286 \times 10^{-24}$ g). La masse d'une mole d'atomes de $^{208}_{82}\text{Pb}$ pouvant être assimilée à 208 g, lancez-vous sur vos calechettes pour déterminer la valeur de la constante d'Avogadro ! (p. 27)

Notons respectivement m_p , m_n et m_e les masses du proton, du neutron et de l'électron. Suivant la règle précisée par l'auteur, la masse $m(^{208}_{82}\text{Pb})$ d'un atome de plomb 208 serait donnée par :

$$m(^{208}_{82}\text{Pb}) = 82m_p + 126m_n + 82m_e = 82(m_p + m_e) + 126m_n.$$

On prendra ici :

$$m_p = 1,672621777(74) \times 10^{-27} \text{ kg} \approx 1,672621777 \times 10^{-24} \text{ g} ;$$

$$m_n = 1,674927351(74) \times 10^{-27} \text{ kg} \approx 1,674927351 \times 10^{-24} \text{ g} ;$$

$$m_e = 9,10938291(40) \times 10^{-31} \text{ kg} \approx 9,10938291 \times 10^{-28} \text{ g}$$

$$= 0,000910938291 \times 10^{-24} \text{ g}.$$

Il vient :

$$\begin{aligned}m({}_{82}^{208}\text{Pb}) &= 82(m_p + m_e) + 126m_n = \\ &82(1,672621777 + 0,000910938291) \times 10^{-24} \text{ g} \\ &+ 126 \times 1,674927351 \times 10^{-24} \text{ g} = [82 \times 1,673532715291 \\ &+ 126 \times 1,674927351] \times 10^{-24} \text{ g} = \\ &(137,229682653862 + 211,040846226) \times 10^{-24} \text{ g} \\ &= 348,270528879862 \times 10^{-24} \text{ g} \\ &= 34,8270528879862 \times 10^{-23} \text{ g}.\end{aligned}$$

Pour obtenir la masse d'une mole de ${}_{82}^{208}\text{Pb}$, soit $M({}_{82}^{208}\text{Pb})$, on utilise ici un logiciel en ligne (<http://www.webqc.org/mmcabc.php>), qui donne ceci :

Enter a chemical formula to calculate its molar mass and elemental composition:

Pb[208]	Calculate!
---------	----------------------------

Molecular weight of Pb[208] is 207.97665211 ± 0.00000001 g/mol

On obtient une approximation du nombre d'Avogadro n_A comme quotient de $M({}_{82}^{208}\text{Pb})$ par $m({}_{82}^{208}\text{Pb})$:

$$n_A \approx \frac{207,97665211 \text{ g}}{34,8270528879862 \times 10^{-23} \text{ g}} = \frac{207,97665211}{34,8270528879862} \times 10^{23} \approx 5,9716983 \times 10^{23}.$$

Si l'on adopte pour n_A la valeur $6,0221415 \times 10^{23}$, l'erreur commise est inférieure à 1 % (ce qui, certes, n'est pas fameux).

⑦ On peut effectuer un calcul analogue pour le carbone 12. Cette fois la masse atomique est donnée par :

$$\begin{aligned}m({}_6^{12}\text{C}) &= 6(m_p + m_e) + 6m_n = 6(m_p + m_e + m_n) = \\ &6(1,672621777 + 0,000910938291 + 1,674927351) \times 10^{-24} \text{ g} \\ &= 6(1,673532715291 + 1,674927351) \times 10^{-24} \text{ g} = \\ &6 \times 3,348460066291 \times 10^{-24} \text{ g} = 20,090760397746 \times 10^{-24} \text{ g} \\ &= 2,0090760397746 \times 10^{-23} \text{ g}.\end{aligned}$$

On obtient ici : $n_A \approx \frac{M({}_6^{12}\text{C})}{m({}_6^{12}\text{C})} = \frac{12 \text{ g}}{2,0090760397746 \times 10^{-23} \text{ g}} \approx 5,97289488 \times 10^{23}.$

L'erreur relative est cette fois inférieure à 0,5 % (= 5 ‰). Ces résultats conduisent à formuler deux nouvelles questions :

Q₂₆. Pourquoi le calcul du nombre d'Avogadro comme quotient de sa masse molaire par la masse d'un atome donne-t-elle des résultats si éloignés de la (ou des) valeur(s) généralement admise(s) ?

Q₂₇. Comment fait-on pour déterminer de bonnes approximations du nombre d'Avogadro ?

3. Moment exploratoire, moment confirmatoire d'une enquête

a) Toute enquête comporte un *moment* – une dimension – *exploratoire*, comme il en va dans ce qui précède, qui suppose une *lecture inventoriante* des exposés recueillis, et un *moment confirmatoire*, où, par *lecture questionnante* surtout, on interroge des exposés et autres « messages ». Bien entendu, le questionnement finalisé d'un exposé est aussi, de fait, l'occasion d'un regard inventoriant sur l'exposé, qui enrichit l'exploration déjà réalisée et parfois contribue à la confirmation de certaines hypothèses, sans que cela soit a priori recherché.

b) On peut s'arrêter par exemple sur les questions suivantes, qui *semblent* renvoyer à un même « point aveugle » :

Q₁₂. Pourquoi certains exposés sur la notion de mole font-ils référence à des moles d'entités autres que les « entités élémentaires [atomes, molécules, ions, électrons, etc.] » évoquées en relation avec le système international d'unités ? Est-ce là le symptôme d'une difficulté caractérisée ? Si oui, laquelle ?

Q₁₇. Quand on parle de « quantité chimique », doit-on entendre cette expression par contraste avec une notion de « quantité physique » ? Qu'entend-on alors par là ? Et en quoi peut-on affirmer que la mole « fait référence [...] à une masse ou à un volume » (regardées sans doute, elles, comme des grandeurs « physiques » plutôt que « chimiques ») ?

Q₂₀. Qu'est-ce qui peut expliquer une tournure de phrase aussi entortillée que celle-ci : « Quant au nombre $6,0221 \times 10^{23}$, il est appelé, lorsqu'on l'exprime en mol : la *constante d'Avogadro*... » ?

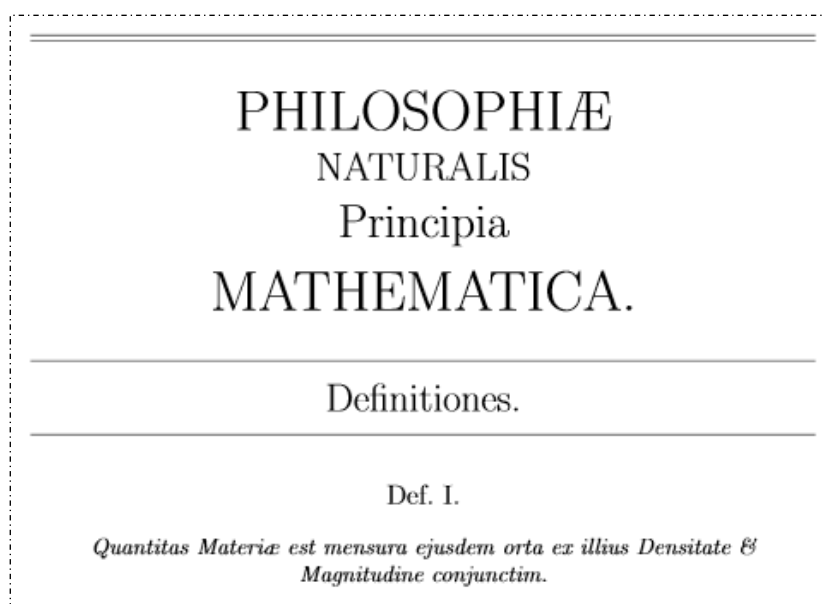
L'hypothèse que l'on peut formuler ici est que la notion de « quantité de matière », qui serait une dimension du réel à l'instar de la longueur ou de la masse, est *mal conceptualisée*.

c) On peut tenter d'interroger à ce propos des exposés d'épistémologie de la chimie (et en particulier d'épistémologie historique de la chimie). On examinera dans ce but l'article – signé par Christiane Buès – figurant à l'entrée « Mole » du *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences* sous la direction de Dominique Lecourt (PUF, 1999/2003) : ce texte est reproduit dans l'annexe, à la fin de ce *Journal*.

① L'auteure y rappelle d'abord la situation actuelle : la mole (de symbole mol), septième des unités de base du SI, introduite en 1971, mesure « la quantité de matière d'un système qui contient autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes de carbone dans 0,012 kilogramme de carbone 12 ». La mole n'est donc pas un nombre, mais une « quantité de matière » constituée d'une espèce ou d'une autre d'« entités élémentaires » en nombre égal au nombre « d'atomes de carbone dans 0,012 kilogramme de carbone 12 ». Même s'il y a référence à une masse, la mole n'est pas une masse mais une grandeur d'une espèce de grandeur *sui generis*, la « quantité de matière » (dont la dimension correspondante est notée N, nous l'avons vu).

② Une mole de ceci et une mole de cela n'ont en règle générale pas la même *masse*. D'où sans doute que, dans le système international, on recommande de préciser l'espèce des entités élémentaires dont on considère une certaine quantité, c'est-à-dire un certain nombre de moles. L'auteure indiquera plus loin qu'au lieu de noter $l = 3 \text{ m}$, on notera par exemple $n(\text{S}) = 3 \text{ (mol)}$ une quantité de matière de 3 moles d'atomes de *soufre* (S).

③ On arrive alors en un point crucial de l'analyse. Dans son ouvrage *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, Newton formulait ainsi sa « Definition I » (<http://www.gutenberg.org/files/28233/28233-pdf.pdf> & <http://www.marxists.org/reference/subject/philosophy/works/en/newton.htm>) : « The quantity of matter is the measure of the same, arising from its density and bulk conjointly. » (Notons que, en anglais, « quantité de matière », *Quantitas Materiæ* dans le latin de Newton, se dit aujourd'hui *amount of substance*.)



L'auteure souligne alors l'opposition entre la situation de la physique et celle de la chimie :

Newton définit des concepts pour la physique. En 1874, Van't Hoff, dans ses *Études de dynamique chimique*, note qu'une différence importante entre l'étude d'un équilibre physique et l'étude d'un équilibre chimique est « l'étonnante diversité des phénomènes chimiques ». Il s'ensuit qu'« en général la simplicité est moins grande, c'est pour cela que le terme de "système" a dû être substitué à celui de "corps" ». En conséquence, la masse ne convient plus pour donner la composition de ce système, il faut utiliser une quantité moléculaire. L'introduction des mesures physiques en chimie impose celle d'une unité, pour exprimer leurs résultats, qui lui soit spécifique.

La masse est omniprésente en physique ; elle l'est aussi en chimie, mais, là, elle se révèle insatisfaisante : tel serait le ressort – selon l'auteure – du passage historique vers la notion de mole. Car, peut-on risquer, 5 g, par exemple, ce n'est pas la même chose – chimiquement – selon qu'il s'agit de 5 g de sodium ou 5 g de plomb.

④ Dans le passage vers la notion « moderne » de mole, le chimiste néerlandais Jacobus van 't Hoff (1852-1911) joue un rôle pionnier :

Van't Hoff travaille dans les pas de Friedrich Horstmann et applique les lois de la thermodynamique aux transformations chimiques. Il a démontré qu'une substance en solution infiniment diluée, qu'il appelle idéale, se comporte comme un gaz parfait. Une solution est définie par la concentration des substances qu'elle contient. Dans l'étude expérimentale quantitative des solutions, les résultats des mesures ne sont exploitables que si la concentration est exprimée non pas en grammes par litre mais en quantité moléculaire, à savoir « le poids moléculaire exprimé en kilogramme dans le mètre cube ». Van't Hoff utilise les unités du système métrique qui se met en place, alors que ses contemporains vont plutôt mesurer cette concentration en poids moléculaire exprimé en grammes par litre, ce qui est rigoureusement identique à la proposition de Van't Hoff. L'expression du poids moléculaire, grandeur sans dimension à laquelle on accole une unité de masse, prend le nom de molécule-gramme. En 1883, Alexander Crum Brown, dans l'article « Molecule » de l'*Encyclopedia Britannica*, présente la molécule-gramme comme nécessaire pour exprimer « la constitution actuelle de la matière ». La molécule-gramme définie par C. Brown doit rendre compte « du très grand nombre de molécules réelles », supposé mais indéterminé et des « poids moléculaires confirmés par les moyens chimiques ».

On voit ici apparaître un « chaînon manquant » dans notre enquête : la notion de *solution* (et celle corrélatrice de *concentration*), qui articule la question des *quantités de matière* à la notion de *gaz parfait*. (Le mot était apparu jusqu'ici, dans notre petit corpus, de façon formelle uniquement, et ce à propos du mot *molalité*.) Mais on voit aussi l'« adhérence » maintenue à la grandeur « masse » : « L'expression du poids moléculaire, grandeur sans dimension à laquelle on accole une unité de masse, prend le nom de molécule-gramme. » À suivre l'auteure on doit conclure que c'est d'abord cette « molécule-gramme » qui exprime et sert les besoins spécifiques de la chimie. (Notez qu'on ne prétend pas, ici, dire ce que sont au juste le « poids moléculaire » ou la « molécule-gramme » : ces questions sont laissées ouvertes pour le moment.)

⑤ C'est alors que s'introduit le nom de *mole* :

Au tournant du XIX^e et du XX^e s. le poids atomique relatif, grandeur sans dimension, devient molécule-gramme, molécule-livre ou molécule-tonne, selon que l'on a adopté le système métrique ou le système anglais, selon que l'on travaille dans un laboratoire ou dans une usine chimique. En 1893, Wilhelm Ostwald, lassé par la lourdeur et la diversité de ces termes mais conscient de l'utilité du concept, écrit dans son *Hand- und Hilfsbuch* : « Nous appellerons de façon générale "Mol" le poids en grammes numériquement égal au poids moléculaire d'une substance donnée. » En 1902, Alexander Findlay, traduisant les ouvrages d'Ostwald en anglais, fait apparaître « mole » avec cette graphie, de manière à conserver la prononciation allemande. C'est l'orthographe qui perdurera.

On notera ici un conflit de date à propos de l'introduction du mot *mol* par Wilhelm Ostwald : 1900 ou 1893 ? Par ailleurs, on apprend que l'adaptation du mot en anglais – *mole* – serait due à Alexander Findlay.

⑥ La question de la mesure de la quantité de matière n'est pourtant nullement réglée. Et les progrès subséquents ne feront d'abord qu'approfondir la « crise » :

La mole ainsi définie est une unité mais que mesure-t-on en moles ? Les physico-chimistes travaillent à l'échelle macroscopique mais leur but est de « connaître les relations entre la constitution *et* les propriétés chimiques ». Van't Hoff pose comme principe au début des *Études* : « La marche d'une transformation chimique est caractérisée uniquement par le nombre de molécules, dont l'action mutuelle produit la transformation. » Le nombre de molécules qui réagissent à l'échelle microscopique est proportionnel au nombre de moles que le chimiste a mises dans l'éprouvette. Son facteur de

conversion est la molécule-gramme qui va être rebaptisée masse molaire. Pendant plus d'un demi-siècle « le nombre de moles », un ersatz de grandeur, va servir à exprimer la « quantité de matière » d'un corps pur dans une réaction. Au niveau théorique, il est la variable chimique qui intervient dans l'expression du potentiel chimique défini par Gibbs (1876-1878) et du degré d'avancement d'une réaction défini par De Donder (1920). Mais en 1913, Jean Perrin a déterminé le nombre de molécules-particules que contient une molécule-gramme de corps pur. La mole n'est-elle plus dès lors qu'un nombre de molécules ? Dans ce cas, du point de vue métrologique, elle ne peut être l'unité de mesure d'une grandeur physique ; une mise en cohérence avec le système international d'unités, qui se construit, s'impose.

Plusieurs assertions méritent d'être soulignées, et tout d'abord celle-ci, attribuée par l'auteure à van 't Hoff, qui exprime ce qui est sans doute la raison d'être principale de la notion de mole (et, en négatif, la raison de l'insuffisance de la notion de masse) : « La marche d'une transformation chimique est caractérisée uniquement par le nombre de molécules, dont l'action mutuelle produit la transformation. » L'auteure note en outre que (a) « le nombre de molécules qui réagissent à l'échelle microscopique est proportionnel au nombre de moles que le chimiste a mises dans l'éprouvette », (b) le « facteur de conversion est la molécule-gramme » et (c) celle-ci « va être rebaptisée masse molaire ».

⑦ De la mole comme nombre de molécules on va enfin passer à la mole, unité de l'espèce de grandeur « quantité de matière » :

En 1901, Giovanni Giorgi a proposé d'ajouter au système « c.g.s. » (centimètre, gramme, seconde), une quatrième unité de base – l'ampère –, pour les mesures électriques. En 1960, faisant suite à l'idée de Giorgi de définir un système dont les unités de base sont le mètre, le kilogramme, la seconde et l'ampère (MKSA), le système international d'unités (SI) est adopté par la 11^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM). Un an après, physiciens et chimistes s'entendent pour adopter l'isotope 12 du carbone comme élément de référence dans la détermination des valeurs des poids atomiques. Les travaux du métrologiste allemand U. Stille et du thermodynamicien anglais E. A. Guggenheim sur le concept d'une grandeur chimique aboutissent. En 1957, Stille a proposé la définition d'une unité de mesure pour la chimie à la commission SUN (Symboles Unités Nomenclature) de l'UIPAP (Union internationale de physique pure et appliquée) qui l'a communiquée à la Commission de chimie physique de l'UIPAC (Union internationale de chimie pure et appliquée). À la demande de ces instances internationales, en 1971, la quantité de matière fut introduite par la 14^e Commission internationale des poids et mesures (CIPM).

Il aura donc fallu presque un siècle pour qu'apparaisse la notion de mole telle qu'elle est conçue aujourd'hui. À suivre l'auteure, on doit conclure que le travail de conceptualisation n'a pas été une promenade de santé. Le processus de longue durée conduisant à la notion actuelle de mole a notamment connu deux grandes étapes, que l'auteure décrit ainsi : première étape, « la molécule-gramme avait permis l'introduction des mesures physiques en chimie » ; deuxième étape, « la définition de la mole, comme unité de base du SI, permet la mise en conformité des mesures chimiques avec les règles de la métrologie ».

d) On pourra doubler le récit précédent par la lecture d'un article de la même auteure intitulé « Histoire du concept de mole (1869-1969) à la croisée des disciplines physique et chimie », paru dans *L'actualité chimique* d'octobre 2000 (voir http://www.lactualitechimique.org/larevue_article.php?cle=158). Faute de place et de temps, on arrêtera là, provisoirement, l'élaboration d'un MPR $\mu(\varphi)$ pour le didacticien. Notre esquisse, encore très flottante, devra être dûment augmentée et consolidée si l'on veut disposer d'un outil permettant par exemple de répondre à la question de savoir si les difficultés qui ont marqué la genèse historique de la notion de mole se sont évanouies aujourd'hui, en particulier – par exemple – dans l'enseignement de la notion de mole en classe de seconde. Pour préparer la suite de l'enquête, et toujours sans entrer dans des exposés scolaires d'aujourd'hui, nous examinerons un dernier exposé, tiré de *l'Encyclopédie autodidactique Quillet* parue en 1958 (tome II). Voici un premier extrait :

V. – MASSES – VOLUMES – DENSITÉS

14. MASSES ATOMIQUES ET MASSES MOLÉCULAIRES.

Nous avons vu (paragraphe 12) que les corps composés ont des formules indiquant qualitativement leur composition ; on a cherché à leur donner une signification quantitative. Pour cela, **le symbole d'un élément représente une certaine masse de ce corps dite masse atomique.** C'est ainsi qu'en convenant de prendre pour le symbole O de l'oxygène la valeur 16 g (16 g est un *atome-gramme d'oxygène*), on est amené à attribuer au symbole Hg du mercure la valeur 200. 200 sera la masse atomique du mercure et la formule Hg O de l'oxyde de mercure aura une double signification :

qualitative : corps formé d'oxygène et de mercure ;

quantitative : 216 g de cet oxyde sont formés par la combinaison de 200 g de mercure avec 16 g d'oxygène.

216 représente la *masse moléculaire* de l'oxyde de mercure, 216 g est une *molécule-gramme* d'oxyde de mercure. (p. 244)

① Ce qui reste obscur ici, c'est comment, ayant attribué au symbole O la valeur 16, on attribue alors à chacun des autres symboles d'éléments

chimiques une valeur bien déterminée. C'est cette valeur numérique (16, 200, etc.) qui est appelée la *masse atomique* de l'élément (laquelle serait donc un *nombre*), tandis que la *masse* correspondante (16 g, 200 g, etc.) serait « un » *atome-gramme* de cet élément. Sur le même patron, la *masse moléculaire* de l'oxyde de mercure Hg O est 216, tandis que 216 g est « une » *molécule-gramme* de ce « corps composé ».

② Un peu plus loin, on rencontre le développement que voici :

VI. – MASSES MOLÉCULAIRES ET MASSES ATOMIQUES

19. THÉORIE ATOMIQUE.

a) On admet aujourd'hui qu'un corps, quel qu'il soit, est constitué par des particules d'une prodigieuse petitesse qu'on ne peut détruire sans détruire par là-même le corps : ce sont ses molécules. Une molécule est donc la plus petite quantité de matière pouvant exister à l'état libre.

Dans un mélange, les molécules sont différentes ; au contraire, dans un corps pur toutes les molécules sont identiques, et leur masse, constante, peut servir à caractériser le corps. Étant donnée l'extrême petitesse des véritables masses moléculaires, on a imaginé des molécules fictives contenant toutes le même nombre N de molécules réelles. Pour des raisons dans le détail desquelles nous ne pouvons entrer, on est conduit à la valeur $N = 6,06 \times 10^{23}$ (Nombre d'Avogadro) ; en tout cas, ce qu'il est important de noter, c'est que les rapports des masses des molécules des différents corps sont ainsi sauvegardés. Ces molécules fictives sont des molécules-grammes ou moles. Par exemple, la mole d'oxygène a une masse de 32 grammes et 32 est la masse moléculaire ou masse molaire de l'oxygène dont il a été question au paragraphe 14.

b) Les molécules sont elles-mêmes des assemblages d'atomes ; ceux-ci ne peuvent exister à l'état libre et doivent, nécessairement, se grouper en molécules, mais, tandis que dans les corps simples les molécules sont constituées d'atomes identiques, les molécules des corps composés sont formées d'atomes différents. C'est ainsi que la molécule d'oxygène est formée de deux atomes de l'élément oxygène d'où la formule O_2 que l'on trouvera dans les différentes réactions où entre de l'oxygène à l'état gazeux; la molécule d'eau est composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène, d'où la formule $H_2 O$.

L'atome-gramme d'oxygène correspond donc à 16 grammes de cet élément : 16 est la masse atomique de l'oxygène : c'est elle qui a servi de base à l'établissement du tableau des masses atomiques tel qu'on le trouvera ci-après et grâce auquel on détermine les masses moléculaires. (p. 245)

③ Notons d'abord l'usage de l'expression « quantité de matière », qui n'est pas encore, sans doute, une grandeur dotée d'un symbole dimensionnel (N) : « Une molécule est [...] la plus petite quantité de matière pouvant exister à l'état libre. » Mais on notera surtout la manière de présenter les *moles* ou *molécules-grammes* comme étant des *molécules fictives* « contenant toutes le même nombre N de molécules réelles », la lettre N désignant le *nombre d'Avogadro* (tenu ici pour égal à $6,06 \times 10^{23}$). Cette image de *molécules fictives* permet, semble-t-il, de progresser un peu : là où, dans le premier extrait, on lisait que « 216 g est une *molécule-gramme* d'oxyde de mercure », on lit maintenant « la mole d'oxygène a une masse de 32 grammes », formulation où l'article indéfini « une » a été remplacé par l'article défini « la » et où *la* mole d'oxygène « a une masse », à l'instar de tout autre réalité matérielle. Il y a là au moins en apparence, en quelques lignes du « texte du savoir » examiné, une avancée « ontologique » sensible. Désormais, semble-t-il, la mole est beaucoup moins ce personnage d'un théâtre d'ombres qu'elle paraissait être dans la période précédente – nous sommes à la fin des années 1960, rappelons-le.

④ Bien entendu, les notions de « *masse moléculaire* ou *masse molaire* » – qui valent 32 pour l'oxygène – tirent dans le sens opposé. On retrouve des formulations analogues (et quasiment identiques à celles usitées dans le premier extrait) à propos de l'atome : « L'*atome-gramme* d'oxygène correspond donc à 16 grammes de cet élément : 16 est la *masse atomique* de l'oxygène. » La tension entre passé et présent transparait à de menus détails qui n'en sont pas moins révélateurs : alors que « la mole d'oxygène a une masse de 32 grammes », « l'*atome-gramme* d'oxygène *correspond* [...] à 16 grammes de cet élément » (c'est moi qui souligne). La conclusion de l'exposé revient sur le point obscur déjà signalé : la masse atomique de l'oxygène, prise égale 16, « a servi de base à l'établissement du tableau des masses atomiques tel qu'on le trouvera ci-après et grâce auquel on détermine les masses moléculaires ». Mais il faut aussi souligner un autre point de fuite de l'organisation praxéologique évoquée par cet exposé : à propos de ces « molécules fictives » que sont les molécules-grammes ou moles, faites chacune de N « molécules réelles », le lecteur découvre que, « *pour des raisons dans le détail desquelles nous ne pouvons entrer*, on est conduit à la valeur $N = 6,06 \times 10^{23}$ » (c'est moi qui souligne, à nouveau). Le fait que la valeur de N diffère quelque peu de celles que l'on rencontre aujourd'hui (du moins dans les exposés que nous avons consultés jusqu'ici) témoigne qu'il y a là un point qui mérite un progrès de l'enquête amorcée ici.

e) On notera en ce point que, contrairement à l'enseignement traditionnel, où l'enseignant propose à l'enseigné un exposé – « son cours » – volontairement

réduit à « l'essentiel », et donc « minimaliste », l'enquête sur une entité praxéologique donnée se caractérise par la rencontre avec une *foule indéfinie d'exposés* constituant ensemble un univers « maximaliste » qu'il conviendra ensuite de réduire pour en tirer le modèle praxéologique de référence cherché. Cela noté, on doit admettre que la construction d'un tel modèle a été à *peine amorcée* dans ce qui précède ; elle devra donc être poursuivie et approfondie. Ce que nous ferons, si les circonstances nous sont favorables, à la rentrée prochaine.

DES QUESTIONS À ÉTUDIER

1. Gyrovagie et dromomanie dans $\vec{\delta}$

a) Lors de la séance 6, je me suis arrêté sur la situation du champ didactique, noté $\vec{\delta}$, saisi décisoirement comme une totalité certes différenciée mais épistémologiquement *une*. Plusieurs problèmes ont été abordés qui méritent d'être encore et encore travaillés, tandis que bien d'autres problèmes n'ont jusqu'ici pas même été *posés*.

b) Je reviens un instant sur la notion de didacticien *gyrovague* ξ' , notion structurante du champ $\vec{\delta}$, pour tenter de dissiper un malentendu possible. On aurait tort d'imaginer ξ' papillonnant d'un domaine à un autre à l'intérieur de $\vec{\delta}$ au gré de sa fantaisie ou de circonstances « mondaines ». L'équipement praxéologique que le chercheur ξ ou l'équipe Ξ doivent se constituer pour étudier des questions mettant en jeu des entités praxéologiques $\wp_1, \wp_2, \dots, \wp_n$, équipement qui inclut, ainsi qu'on l'a vu, des suites $(\mu_i(\wp_j))_{i \geq 0}$ (pour $j = 1, 2, \dots, n$), ne saurait en effet se créer à très court terme : ξ et Ξ doivent longuement, itérativement, « labourer » le canton de $\vec{\delta}$ que leur questionnement didactique les a conduits à explorer. Or, paradoxalement, ce qu'on observe, même quand ξ et Ξ se veulent exclusivement et indéfiniment affiliés à la didactique $\partial_{\mathcal{D}}$ d'une discipline \mathcal{D} , ce sont des séjours de courte ou de moyenne durée dans les « sites » de \mathcal{D} que ξ ou Ξ ont effectivement étudiés. Ainsi voit-on fréquemment les apprentis chercheurs « changer de sujet » entre la première et la deuxième année de master, puis, surtout, entre leur travail de master et leur travail de thèse, comme s'ils avaient épuisé la veine sur laquelle ils n'ont fait pourtant que jeter un premier regard ! Ce qu'il y avait de *prometteur* dans le mémoire de master va alors s'assécher et disparaître parce que ξ et Ξ seront « passés à autre chose », quoique toujours à l'intérieur de $\partial_{\mathcal{D}}$! Pour le dire autrement, nous ne devons pas confondre gyrovagie et « dromomanie ».

c) Je reviens maintenant sur un détail qu'on n'aura pas manqué de noter : dans ce qui précède, j'ai presque toujours mis des guillemets au mot *spécialiste*. À nouveau, il ne faudrait pas se méprendre sur le sens de cette apparente réserve. Ce qu'on nomme généralement un « spécialiste », dans les contextes où le mot a été employé, renvoie souvent à l'idée de « personne ayant fait des études supérieures formelles dans une certaine discipline \mathcal{D} », discipline dont il devient par là un « spécialiste » supposé. C'est ainsi que les associations de professeurs d'une discipline scolaire donnée se désignent elles-mêmes sous le nom d'*associations de spécialistes*. En dehors même de toute allégeance à cet usage particulier, la signification générale de ce mot en français – il s'applique à une personne « qui a des connaissances approfondies dans une branche particulière d'un métier, d'une science, d'un sujet », précise le *TLFi* – conduit à penser qu'un spécialiste de \mathcal{D} , ou de $\Delta \subset \mathcal{D}$, ou de $\Sigma \subset \Delta$ aurait une connaissance *uniformément* et *adéquatement* approfondie de \mathcal{D} , ou de Δ , ou de Σ . Or c'est là que, en particulier, le bât blesse. L'expérience montre que ce présupposé d'uniformité n'est (presque) jamais vérifié et que, en conséquence, l'usage du mot de spécialiste est *en cela* illusoire. Cela pointé, et faute de pouvoir changer le sens commun du mot, je crois utile de substituer à ce langage – « un tel est un spécialiste de ceci, tel autre ne l'est pas, c'est un spécialiste de cela » – un *autre* langage, selon lequel on dira qu'un tel *a étudié* tel sujet, qu'il l'a *un peu étudié*, qu'il l'a *beaucoup étudié*, qu'il l'a *encore insuffisamment étudié*, etc. En un sens que le mot n'a plus en français, « spécialiste » devrait ici être remplacé par « étudiant », celui qui a étudié ou qui étudie. La chose, je l'ai plusieurs fois notée, reste possible en anglais, où *student* ne s'applique pas qu'aux élèves et étudiants (au sens français de ces termes) mais peut désigner plus largement « a person who makes a thorough study of a subject » (<http://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/student>), sens dans lequel l'espagnol possède d'ailleurs *estudioso* (qui se distingue d'*estudiante*, l'étudiant au sens courant du terme). Pour conduire une recherche en didactique relative à une question Q qui met en jeu des entités praxéologiques $\wp_1, \wp_2, \dots, \wp_n$, un didacticien ξ doit avoir « suffisamment étudié » $\wp_1, \wp_2, \dots, \wp_n$, ce qui se verra aux modèles praxéologiques de référence $\mu(\wp_1), \mu(\wp_2), \dots, \mu(\wp_n)$ que ξ ne manquera de rendre explicites. Devant toute entité \wp , devant toute question Q , le didacticien ξ devra se demander : 1) « L'ai-je étudiée ? », 2) « L'ai-je *suffisamment* étudiée ? », 3) « Dois-je en reprendre ou en approfondir l'étude ? ». Se croire ou se dire spécialiste ne suffit pas.

2. Le souci de $\vec{\delta}$

a) Le souci du champ didactique $\vec{\delta}$ pris dans sa totalité change notablement le contenu de l'engagement des didacticiens ξ dans la gestion scientifique de

leur champ de recherche. Je mentionnerai ici sommairement, avant d'y revenir l'année prochaine, plusieurs objectifs d'un tel engagement au service de $\vec{\delta}$.

b) Le premier objectif sans doute est d'empêcher que telle ou telle partie du champ didactique soit livrée improductivement, voire contre-productivement, à des bandes moins soucieuses de faire de la science que de s'emparer des pouvoirs existants, avides qu'elles sont de toute parcelle de pouvoir possible. La chose est particulièrement dommageable pour $\vec{\delta}$ lorsqu'une telle bande a pour chef une personne qui, « sélectionnée » pour sa capacité à accumuler le pouvoir, est et reste un *minus habens* scientifique. Je n'en dirai pas plus sur ce problème ici.

c) Le deuxième objectif est de pourvoir de façon pertinente à la *formation des didacticiens* ξ . La journée du 10 juin à l'IFÉ, dont j'ai parlé dans le *Journal* de la séance 6 de ce séminaire, m'a ainsi convaincu un peu plus que, quelle que soit sa formation initiale, tout didacticien devrait avoir des lumières appropriées – c'est-à-dire qui éclairent sans aveugler – concernant la production scientifique – « normale » ou « critique » – dans l'ensemble des champs (qui se veulent) scientifiques, aussi bien du côté des sciences de la nature que des sciences de la culture. J'illustrerai cela à propos de trois difficultés qu'il est loisible d'observer quand on nomadise à travers $\vec{\delta}$.

① La cité didacticienne doit amorcer une rupture avec les conceptions classificatoires naïves et naïvement empiristes de « la science ». Jorge Luis Borges (1899-1986) a génialement croqué le « classificationnisme » vulgaire dans un texte intitulé « El idioma analítico de John Wilkins » (1952, *Otras inquisiciones* : voir http://www.upv.es/laboluz/leer/books/borges_otras_inquisiciones.pdf), où il évoque « certaine encyclopédie chinoise » qui classe ainsi le monde animal :

... los animales se dividen en (a) pertenecientes al Emperador, (b) embalsamados, (c) amaestrados, (d) lechones, (e) sirenas, (f) fabulosos, (g) perros sueltos, (h) incluidos en esta clasificación, (i) que se agitan como locos, (j) innumerables, (k) dibujados con un pincel finísimo de pelo de camello, (l) etcétera, (m) que acaban de romper el jarrón, (n) que de lejos parecen moscas.

... les animaux se divisent en : a) appartenant à l'Empereur, b) embaumés, c) apprivoisés, d) cochons de lait, e) sirènes, f) fabuleux, g) chiens en liberté, h) inclus dans la présente classification, i) qui s'agitent comme des fous, j) innombrables, k) dessinés avec un pinceau très fin en poils de chameau, l) *et cætera*, m) qui viennent de casser la cruche, n) qui de loin semblent des mouches.

... the animals are divided into: (a) belonging to the emperor, (b) embalmed, (c) tame, (d) sucking pigs, (e) sirens, (f) fabulous, (g) stray dogs, (h) included in the present classification, (i) frenzied, (j) innumerable, (k) drawn with a very fine camelhair brush, (l) et cetera, (m) having just broken the water pitcher, (n) that from a long way off look like flies.

La version française ci-dessus du texte de Borges est empruntée à la préface de l'ouvrage de Michel Foucault, *Les mots et les choses* (Gallimard, 1966, p. 7). La version anglaise est celle proposée dans le document qu'on trouvera en ligne à l'adresse suivante : <http://www ldc.upenn.edu/myl/wilkins.html>.

② La TAD semble, hélas, un analyseur efficace – quoique, certes, partiel – de l'état de la culture scientifique dans le champ $\vec{\delta}$. On sait ainsi que l'usage fait en TAD de notations symboliques – par exemple pour noter le rapport institutionnel à l'objet o pour la position p de l'institution I , soit $R(p; o)$ – suscite une animosité qui s'exprime parfois de manière passionnée, voire délirante. Un abord raisonné de cette animadversion pourrait sans doute s'appuyer sur la notion de *littéralisation* (introduite, sauf erreur, par Jean-Claude Milner), qui étend la notion de *mathématisation* et, sans doute, la précède génétiquement. Parlant dans son ouvrage *Clartés de tout* (Verdier, 2011) de la linguistique de Roman Jakobson (1896-1982), et évoquant la formule de Lacan selon laquelle « l'inconscient est structuré comme un langage », Milner répond ainsi à l'un de ses interlocuteurs, Juan Pablo Lucchelli :

La linguistique jakobsonienne construit une science galiléenne, en usant non pas des mathématiques au sens étroit, mais d'une littéralisation au sens large ; c'est cela que résumement, dans cette linguistique, les termes corrélatifs de *structure* et de *signe*. Pour en revenir à votre question de départ, concernant le *comme* dans « comme un langage », je note que ce terme s'articule à « structuré ». Or, « structuré » renvoie au littéral, en tant qu'il peut être disjoint du mathématique. Il est vrai que cette disjonction n'a pas été nette d'emblée; elle est apparue peu à peu... (p. 14)

Un peu plus loin dans ce dialogue, Milner évoque et commente la célèbre formule de Galilée dans le chapitre 6 d'*Il saggiatore* (« L'essayeur », paru en 1623 : voir à l'adresse http://it.wikisource.org/wiki/Il_Saggiatore) selon laquelle le grand livre de l'univers est écrit en caractères (*caratteri*) mathématiques :

J.-C. M. ... Dans la linguistique de Jakobson, la littéralisation n'est pas nécessairement dépendante des mathématiques. De là suit une conséquence majeure pour le galiléisme. Ce qui était censé lui être essentiel, on comprend

désormais que ce n'est pas la mathématisation en elle-même, c'est la littéralisation, dont la mathématisation est une forme parmi d'autres. Les fameuses « petites lettres »...

J. P. L. Les petites lettres de la syntaxe...

J.-C. M. Ces petites lettres qui réapparaissent dans le *Séminaire XX* [de Lacan] à propos de Bourbaki, il faut voir que c'est très important. Cela veut dire que quand Galilée dit que le grand livre de la nature est écrit en lettres mathématiques, le mot important est *lettres* et non pas *mathématiques*. (pp. 15-16)

Il y a là un point de départ de réflexions qu'il nous faudra poursuivre. En attendant, je proposerai à la méditation de qui serait tenté de croire cette littéralité absente de... la littérature, le passage ci-après de la « sorte de préface » que Paul Valéry (1871-1945) donna au recueil, publié à titre posthume chez Gallimard (qui en a republié l'édition originale, datée de 1937, en 2010), de *Thèmes anglais pour toutes les grammaires* dû à Stéphane Mallarmé (1842-1898), dont on sait peut-être qu'il fut professeur d'anglais (notamment au lycée Fontanes, devenu lycée Condorcet, à Paris) :

La syntaxe était à ce poète une algèbre qu'il cultivait pour elle-même. Il aimait quelquefois de généraliser certains tours qu'elle n'offre que dans des cas singuliers, ou bien d'entrelacer des propositions dans une phrase, et de se risquer dans une sorte de contrepoint littéraire qui amenait entre les termes ou les idées, des contacts ou des écarts savamment calculés. On eût dit qu'il pressentait ce qui se découvrira quelque jour, et dont on voit déjà plus d'un présage : que les formes du discours sont des figures de relations et d'opérations qui, permettant de combiner ou d'associer les signes d'objets quelconques et de qualités hétérogènes, peuvent nous servir à nous conduire à la découverte de la structure de notre univers intellectuel. (pp. 9-10)

③ Une autre difficulté dont la TAD est un révélateur privilégié est liée à l'enfermement du chercheur ξ dans les conceptualisations culturelles ambiantes, qui limitent ainsi l'horizon de son activité. Faire évoluer cette situation figée est un troisième objectif pour qui a le souci du champ $\vec{\delta}$. Parmi les notions de base de la TAD figure ainsi la notion de praxéologie, qui tend de nombreux pièges aux fidèles du *ready-made* conceptuel. Je ne mentionnerai ici qu'un de ces pièges : celui constitué par l'emploi que l'on fait en TAD du mot de *théorie*. Il appert en effet que certains chercheurs ne peuvent guère concevoir d'employer ce terme en un sens autre que celui qu'ils leur attribuent dans leur idiolecte familial, où « théorie » désigne une élaboration de haute lignée « scientifique » et ne saurait « donc » renvoyer aux productions d'une personne ou d'une institution qui ne se situerait pas, à leurs yeux, au meilleur niveau de l'activité idéationnelle. Ils ne sauraient en

conséquence considérer que, selon un postulat de la TAD que je me dois de rappeler, toute personne, toute institution « possède » une théorie relative à tel ou tel domaine de son univers cognitif – une théorie d’autant plus essentielle que, en vérité, *c’est elle qui les possède*. Un petit enfant a une théorie des papas, des mamans, des bébés, etc. Cela veut dire qu’il est habité par certaines idées à propos des papas, des mamans, des bébés, etc., et que cela a une incidence sur ses technologies et ses techniques. Par contraste, le figement culturel du concept de théorie le rend impropre à produire le sens que la TAD lui assigne. Ce refus ou cette impossibilité d’outrepasser les diktats du langage établi vont à contre-fil de toute perspective anthropologique. Je ne prendrai ici qu’un seul exemple, emprunté à un auteur qui ne se laissait pas faire par le monde-tel-qu’il-est. Sigmund Freud (1856-1939) publie en 1905 ses *Drei Abhandlungen zur Sexualtheorie* – « Trois essais sur la théorie de la sexualité ». Il publiera en 1908 un texte intitulé *Infantile Sexualtheorien*, « théories infantiles de la sexualité ». Comme on le lit, il s’agit bien de théories *infantiles* : les enfants *ont des théories*. Ce que le mot « théorie » désigne, ici, semble renvoyer plutôt au bloc technologico-théorique qu’à la seule théorie ; mais cela importe peu. Voici à des fins d’illustration un unique extrait des *Trois essais* freudiens, dans une traduction due à Philippe Koepfel, lequel, contre la tradition, rend le titre original en allemand par *Trois essais sur la théorie sexuelle* (Gallimard, 2007), au plus près de la formulation freudienne :

L’ÉCHEC TYPIQUE DES RECHERCHES SEXUELLES ENFANTINES

De façon générale, on peut dire des théories sexuelles enfantines qu’elles sont les reflets de la propre constitution sexuelle de l’enfant et qu’en dépit de leurs erreurs grotesques elles témoignent d’une meilleure compréhension des processus sexuels que celle qu’on attendrait de la part de leurs auteurs. Les enfants perçoivent aussi les modifications que la grossesse entraîne chez leur mère et savent les interpréter correctement ; la fable de la cigogne est très souvent racontée à des auditeurs qui l’accueillent avec une méfiance profonde, mais le plus souvent silencieuse. Toutefois, dans la mesure où deux éléments restent inconnus de la recherche sexuelle infantine : le rôle fécondant du sperme et l’existence de l’orifice sexuel féminin – les mêmes points, du reste, que ceux dans lesquels l’organisation infantile est encore en retard –, les efforts des chercheurs restent malgré tout régulièrement infructueux et s’achèvent sur un renoncement qui entraîne souvent une dégradation durable de la pulsion de savoir. Les recherches sexuelles de ces premières années de l’enfance sont toujours solitaires ; elles représentent un premier pas vers l’orientation autonome dans le monde et éloignent considérablement l’enfant des personnes de son entourage, qui jusque-là jouissaient de sa pleine confiance. (pp. 126-127)

Voilà qui s'appelle prendre au sérieux son objet d'étude ! Ces « chercheurs », dont les spéculations n'aboutissent pas complètement du fait d'obstacles dirimants, élaborent des théories, non moins que les chercheurs de métier. Les différences sont à rechercher ailleurs.

e) J'ajouterai une ultime notation relative à l'attention à porter au développement de $\vec{\delta}$. J'ai noté depuis assez longtemps la quasi-inexistence de domaines de $\vec{\delta}$ que la problématique *primordiale* en didactique fait pourtant apparaître, selon moi, comme cruciaux. Ainsi en va-t-il, même si certains gardiens obsidionaux et improductifs de la « didactique du français » n'en ont cure, de ces domaines de $\vec{\delta}$ que sont la didactique de l'*orthotypographie du français* et la didactique de la *prononciation du français* – domaines de la didactique dont nous examinerons une autre fois ce que peut être l'utilité sociale « primordiale ».

3. Le rapport à l'empirie : quelques principes heuristiques

a) J'ai eu l'occasion de m'exprimer, le 7 juin dernier, dans le cadre du séminaire ACADIS, dont la responsable actuelle est Teresa Assude, sur un thème déjà plusieurs fois abordé : mon exposé était en effet intitulé *Sur les praxéologies de recherche en didactique : écouter, faire parler, entendre le réel ?* Je reprendrai ici une *partie* de cet exposé, à savoir ce que j'ai appelé dans ce contexte « quelques principes heuristiques de base » du commerce du chercheur ξ avec l'empirie, en réduisant chaque fois mes commentaires à quelques remarques.

b) Le premier bloc de principes est le suivant :

1. La *clinique didactique* se laisse analyser en (a) le *prélèvement* de données par *cueillette* sur la « nature » (paradigme du chasseur-cueilleur paléolithique), et (b) la *récolte* de données provoquées par création d'une « nature artificielle » (paradigme de l'agriculteur néolithique).

2. Le *prélèvement* de données se fait par l'*observation naturaliste*, soit « by careful observation of events in their natural setting », comme l'écrit Arthur S. Reber dans son *Dictionary of psychology* (1985) à l'entrée « Naturalistic observation », observation qui peut être flottante, ponctuelle, au long cours et suppose une culture de la « chasse aux données », de la *mētis* (*Μῆτις*), de la *sérendipité*, en lien privilégié avec les *paradigmes indiciaires* de la recherche (selon un expression introduite dans les années 1970 par l'historien Carlo Ginzburg).

3. La *récolte* de données suppose une culture « expérimentale » qui permette une action contrôlée sur des « systèmes » que ξ *perturbe* par des *études de cas*, des *quasi-expériences* (\approx *queasy experiments*, l'anglais *queasy* signifiant « qui

met mal à l'aise, qui donne la nausée »), des études *cas-témoins*, des *expériences* « véritables », i.e. *randomisées*, etc.

4. *Cueillettes* et *récoltes* fabriquent des corpus de « données » $D_i(P, Q)$ relatifs à des échantillons $E \subset P$. Les objets étudiés peuvent être des personnes, des institutions et tout type de *productions* et *traces* (erratiques ou systématiques), en particulier des *exposés*, déclarations orales ou écrites sur tel ou tel thème.

① Le *paradigme du chasseur-cueilleur paléolithique* est essentiel et, semble-t-il, trop négligé. En ce cas, il est clair que les conditions et contraintes déterminant les données recueillies ne sont pas le fait de l'activité propre de ξ , même si le *choix* de ces données dépend en partie de ξ : cueillir des données ici ou les cueillir là change le contenu du « repas de chercheur » à venir.

② Le *paradigme de l'agriculteur néolithique* est évidemment, là comme ailleurs, la grande affaire : le chercheur ξ y *produit* les données qu'il récoltera ensuite. Cela ne veut pas dire pour autant qu'il « maîtrise », en quelque sens que ce soit, l'ensemble des conditions et contraintes sous lesquelles cette production a lieu : en ce sens, toute expérience est une quasi-expérience et, pour qui sait y voir, à certains égards une « *queasy experiment* ». Il en est en particulier ainsi dans le type « d'agriculture didactique » le plus prisé, celui que l'expression d'*ingénierie didactique* résume. Cette technique permet sans doute d'obtenir des données que l'observation naturaliste ne procurerait pas (ou ne fournirait que de façon erratique) ; mais on est loin du contrôle « total » qui est le fantasme récurrent de l'expérimentalisme radical – lequel oublie que toute « expérience » ne prend son sens (provisoirement) ultime que dans le cadre d'une clinique intégratrice armée par un modèle didactique de référence (MDR) incluant un modèle praxéologique de référence (MPR).

③ Les *exposés* sont des *témoignages* provoqués par des conditions et contraintes qu'il convient dans tous les cas d'analyser. Ces témoignages peuvent être disponibles *a priori* (le chercheur se fait alors chasseur-cueilleur) ou suscités par le chercheur (qui se fait alors agriculteur), celui-ci prenant une certaine catégorie de personnes ou d'institutions pour *témoins*.

c) Voici maintenant un deuxième bloc de principes :

5. La technique d'enquête mise en œuvre par ξ s'appuie sur la *dialectique* des études *exploratoires* et des études *confirmatoires*

6. Dans une étude *exploratoire*, on suppose d'abord l'*inertie relative* des conditions ambiantes et la faible *variabilité* ou la *quasi-invariance* des conditions examinées.

7. Lors des *prises d'information* relatives à des personnes ou des institutions,

le chercheur s'efforce de faire fonctionner ces *médias* occasionnels comme des *milieux* (adidactiques) relativement à la question *Q* étudiée.

① On a croisé plus haut (dans l'entame d'enquête sur la notion de mole) un exemple de jeu entre moment exploratoire et moment confirmatoire d'une enquête. Sauf exception justifiée, on commence par faire comme si les conditions examinées *c* et les conditions ambiantes *ĉ* étaient (très) faiblement variables sur la population étudiée, au besoin en reformulant ces conditions, par exemple par disjonction : $c = c_1 \vee c_2 \vee \dots \vee c_n$, où les conditions c_i sont supposées compatibles. (Il en va ainsi par exemple avec la condition suivante : « l'exposé ne fournit pas de valeur du nombre d'Avogadro n_A ou donne une valeur proche de $6 \cdot 10^{23}$. ») Le *progrès de l'enquête* verra ensuite de telles conditions disjonctives être décomposées en sous-conditions qui pourront alors être confrontées les unes aux autres (par exemple a-t-on $n_A \approx 6,02204 \cdot 10^{23}$ ou $n_A \approx 6,02214 \cdot 10^{23}$?).

② Faire parler une personne comme un milieu adidactique ne va pas de soi. Il y a même là quelque chose d'impossible, pour des raisons qui, dans l'échelle de codétermination didactique, pourraient bien toucher au niveau de l'*humanité*. Voici sur ce point un extrait d'un texte récent du neurologue Laurent Naccache intitulé *De quoi prenons-nous conscience ?* (Éditions Manucius, 2013) :

Une fiction-interprétation-croyance « en liberté »

Comme très souvent la découverte d'un principe général du fonctionnement de l'esprit est plus aisée à réaliser en l'observant chez des patients neuropsychologiques où il s'exprime de manière « caricaturale ».

La démonstration clinique à mon sens la plus forte du caractère fictionnel de notre réalité psychique provient des travaux que Sperry et Gazzaniga ont initiés dès la fin des années 1970 en étudiant des malades neurologiques souffrant d'épilepsie sévère dont les deux hémisphères ont été anatomiquement séparés du fait d'une section chirurgicale des voies nerveuses qui les font normalement communiquer. Chez de tels malades, au « cerveau divisé » ou *split brain*, le corps calleux – le nom de la structure de projection des fibres blanches qui unit nos deux hémisphères cérébraux – a été sectionné par un neurochirurgien dans l'objectif de réduire le retentissement de leurs crises d'épilepsie quotidiennes. Chez les malades de Sperry et Gazzaniga, la section du corps calleux a brisé l'unité de leur pensée, ils ont deux esprits conscients sous un seul crâne ! Deux hémisphères conscients qui ne peuvent communiquer ensemble, et dont un seul des deux (en règle générale, l'hémisphère gauche) contrôle l'appareil du langage et est seul donc capable de tenir une conversation. Gazzaniga s'est intéressé à cette condition neurologique exceptionnelle, afin de révéler le rôle fondamental des

mécanismes d'interprétation fictionnelle dans notre fonctionnement conscient. Plus spécifiquement, il a élaboré de nombreuses situations expérimentales dans lesquelles il demandait à l'un des deux hémisphères seulement de réaliser un comportement précis, puis demandait ensuite à l'autre hémisphère l'explication de ce comportement dont il ignorait l'origine véritable. Dans toute une série d'expériences neuropsychologiques, Gazzaniga a fait cette stupéfiante découverte : lorsque l'on soumet ainsi l'hémisphère interrogé à d'insolubles énigmes, ce dernier répond très souvent en inventant une explication imaginaire et fictive, en l'occurrence fausse, à laquelle il croit en toute bonne foi ! Sans d'ailleurs avoir conscience d'avoir élaboré un tel scénario explicatif. Indice suggérant que la première couche interprétative opère ici en amont de la prise de conscience. Dans l'une de ses observations les plus saisissantes, Gazzaniga demande à l'un de ces malades de fixer un écran situé droit devant lui. Soudain, sans en avoir averti le patient, un verbe apparaît quelques dixièmes de seconde à la gauche de l'écran WALK (« marchez »). Cet ordre verbal présenté dans le champ visuel gauche du patient n'est reçu que par les régions visuelles de son hémisphère droit du fait de l'organisation anatomique croisée des voies visuelles. Autrement dit, l'hémisphère gauche n'a pas reçu cette consigne. L'hémisphère droit est capable de comprendre, sans pouvoir le lire à voix haute, cet ordre qui tenait en un seul mot. Gazzaniga reste silencieux. Le patient se lève et se met à marcher vers la porte de la pièce. Arrivé au pas de la porte, Gazzaniga l'interpelle soudain, et lui demande : « Où allez-vous ? » Il faut bien réaliser que la réponse verbale que le malade va alors formuler n'est que celle de son hémisphère gauche, celui qui a le contrôle du langage parlé. Nous allons donc avoir accès à l'opinion de cet hémisphère gauche sur le comportement du corps auquel il appartient. Cet hémisphère gauche ignore ce que sait et ce qu'a ordonné l'hémisphère droit. En réalité, Gazzaniga pose là à l'hémisphère gauche déconnecté du patient une question insoluble. Ce dernier va-t-il alors adopter une attitude cartésienne et rationnelle et tenir un discours tel que : « À vrai dire, je ne sais pas, je constate simplement que je ne connais pas l'origine de ce comportement... » ? Loin de là ! Le patient répond du tac au tac quelque chose comme par exemple : « Je vais à la maison chercher un jus de fruit ». Au-delà du cadre « autoritaire » de l'expérimentation, au-delà de la question inductrice d'une réponse, au-delà de l'histoire individuelle du malade qui peut sans doute contribuer au choix de cette réponse précise parmi un immense répertoire de réponses possibles, il faut bien réaliser que ce qui est ici stupéfiant, c'est que le malade produise, à son insu, une explication, une signification, et qu'il y croie consciemment avec une conviction assez forte. Plutôt qu'un regard lucide porté sur une question dont il ignore la réponse « objective » – « Je n'en ai pas la moindre idée ! » –, le malade étudié par Gazzaniga produit un sens fictif à ce qui lui arrive. (pp. 13-16)

(Pour un exemple de séance de travail de Michael S. Gazzinaga avec un patient au cerveau divisé, on pourra visionner la vidéo qu'on trouvera en ligne à l'adresse <http://hypnosisschool.org/hypnotic/brain-areas.php>.) Nous serions donc façonnés par l'évolution pour « répondre de nos actions », quelque illusoires que soient nos explications. Si l'on s'arrête sur l'exemple donné par Laurent Naccache, toutefois, on doit souligner ceci : le sujet observé donne un motif à sa conduite alors même qu'il en ignore la vraie raison ; mais son explication n'est pas délirante et, en fait, *nous informe sur le monde où il vit*, où l'on peut choisir d'aller chez soi pour y chercher un jus de fruit. C'est là un exemple de *lecture écologique* des énoncés qui nous fournit une condition du type : « dans le monde où évolue le témoin, il est possible de choisir d'aller chez soi pour y chercher un jus de fruit ». Le sujet témoigne de cette condition en cela qu'il rend non déraisonnable la conjecture qu'elle serait avérée. En d'autres termes, le *média* qu'est le sujet « parle faux » quant au mobile de son action ; mais il « parle vrai » quant au monde où il évolue : il fonctionne à son endroit comme un *milieu adidactique*. Il est un tel milieu pour certaines questions, et il ne l'est pas pour d'autres questions : telle est la loi générale de la clinique didactique. Bien entendu, faire le départ entre les déclarations d'un témoin donné qui seraient sujettes à caution et celles qui peuvent être reçues pour véridiques est *toujours* entaché de risques.

d) Voici enfin un troisième bloc de principes :

8. Dans l'exploitation de données recueillies (par le chercheur ou par autrui), on se restreint le plus possible à celles de ces données qui apparaissent *a priori* comme *les moins susceptibles* d'altérations liées aux conditions de leur recueil.

9. Le chercheur s'efforce d'analyser les données obtenues pour y guetter l'apparition de *régularités* dont il cherche la *confirmation empirique* et l'*explication théorique* tout en se gardant énergiquement de la tentation de *surexploiter* ses données – la tentation du *data snooping* (voir ci-après).

① Le principe 8 *ne signifie pas* que le recueil des données doit viser à ne modifier en rien les conditions courantes de la situation observée : ne *rien* modifier n'est, au vrai, pas possible. Mais, dans la perspective dessinée par les remarques précédentes, ce principe énonce simplement que l'on recherche les conditions qui paraissent *non altérées* par cette modification de certaines conditions ambiantes. On est donc ramené aux remarques ci-dessus sur l'art subtil de ne retenir d'un témoignage que ce qui ne dépend pas des altérations engendrées par le recueil lui-même.

② Le principe 9 met en garde contre le *data snooping*. Celui-ci est défini ainsi dans le *Dictionary of Psychology* déjà cité :

data snooping Laboratory jargon for “scattershot” [= generalized and indiscriminate] rummaging [*fouiller*] through one’s data looking for statistically significant effects without an a priori rationale. The “significant” findings that emerge from such operations are likely to be spurious [= fallacious] and due merely to random fluctuations, particularly when the data base is large or the number of factors high. To a certain extent such snooping [*furetage*] is carried out by nearly all researchers but the responsible course is to use any adventitious [*fortuit*] findings as heuristics for future experimentation and not to report them as robust effects based on the original study. (p. 175)

On aura noté la référence quasi explicite à la *dialectique des études exploratoires et des études confirmatoires*. On notera encore l’usage de l’adjectif *robuste* : le problème posé à ξ est celui de la « robustesse » des conclusions de ses analyses de données. (En statistique, précise l’article « Robustesse » de *Wikipédia*, « la robustesse d’un estimateur est sa capacité à ne pas être modifié par une petite modification dans les données ou dans les paramètres du modèle choisi pour l’estimation ».) Notons ici, à propos de la tentation de « fureter dans ses données », ce fait fondamental auquel toute enquête renvoie : toute prise d’information sur un « système » (personnel ou institutionnel) suppose une perturbation et une tension, un *rapport de forces*.

③ Le réel, donc, ne se laisse pas connaître aisément, « comme par enchantement ». Les verbes *to snoop*, *to pry* (et les noms *snoop* et *pry*, l’adjectif *snoopy* « offensively curious or inquisitive ») le disent en anglais. (L’adjectif *inquisitive* est défini par le dictionnaire Macmillan en ligne comme le fait de « asking a lot of questions about things, especially things that people do not want to talk about ».) En français nous avons les adjectifs *curieux*, *interrogateur*, *inquisiteur*, *inquisitorial* (qui existe aussi en anglais) et les verbes *fouiner*, *fureter*, *fourrer son nez dans*, *arracher les vers du nez à qqn*, etc. Noter que *inquisitorial*, d’après le *TLFi*, est dérivé du latin médiéval *inquisitorius* « qui interroge ; d’enquête », adjectif daté de 1293 par le *Dictionary of Medieval Latin from British Sources* (1965-2014) de Ronald Edward Latham, David Robert Howlett, Richard Ashdowne, et al. (voir à http://en.wikipedia.org/wiki/Dictionary_of_Medieval_Latin_from_British_Sources).

e) On illustrera maintenant sur un exemple quelques aspects de l’activité de chasseur-cueilleur du chercheur ξ . Je suppose une recherche visant à expliquer la formation du rapport institutionnel $R(p ; \mathfrak{N})$ aux mathématiques

☞ pour une position p dans une institution I (celle d'élève de lycée par exemple). Dans ce but, ξ s'est procuré un exposé qui est en fait un article paru dans le quotidien *Libération* du lundi 13 mai 2013. Cet article se présente comme restituant des propos recueillis par une journaliste de ce quotidien, Catherine Mallaval, auprès de « Magalie Chauvigny, 35 ans, professeure de maths au lycée Alfred-Kastler de Cergy-Pontoise ». En voici le contenu :

J'avais envie de changer l'image des maths

« J'ai toujours voulu enseigner, être au contact d'élèves qui bossent ou non, avoir la chance de voir l'étincelle dans leurs yeux quand ils comprennent... J'aurais pu choisir d'être prof d'histoire ou de français, mais j'ai préféré les maths. J'avais envie de changer l'image de cette matière, souvent la bête noire des élèves. Dans les téléfilms, le prof de maths est toujours le méchant ! Et puis j'aime cette discipline : on démontre, on prouve. Je ne regrette pas. Même si certains nous traitent de fainéants, je m'en moque. J'ai ma conscience pour moi, tant je passe de temps à peaufiner mes cours. « Cette année, je me partage entre une classe de seconde "classique" et deux premières dans le cadre du Lycée de la nouvelle chance qui vient d'ouvrir au sein de l'établissement. Nous y accueillons des jeunes de 18 à 23 ans qui ont décroché, certains depuis six mois, d'autres depuis trois ans. Il y a beaucoup d'absentéisme. Parfois, je fais cours à deux, trois élèves. Il y a les cours à 9 h 30 ou 10 h 30. Beaucoup ne se lèvent pas. Ils en ont perdu l'habitude. Il va falloir réfléchir à cela. Au fait aussi que quand ils sont peu nombreux, 15 au maximum par classe, il peut y avoir des crispations plus fortes entre eux. On ne l'avait pas prévu. L'hiver a été dur. Je demandais à quoi je servais, comment les mener au bac. Maintenant, je me dis qu'il n'y a pas que le bac. On les aide à reprendre confiance, à se socialiser. Je ne vois pas mes élèves uniquement à travers le prisme des maths. Avant cette expérience, cela me désolait de voir que certains décrochaient dès la seconde. « L'essentiel des réformes est centré sur le primaire, avec le projet louable d'alléger les journées. Mais nous, dans le secondaire, nous courons après les heures d'enseignement. On a parfois l'impression d'aller trop vite dans les programmes. Or il est important de faire des cours qui profitent à tous. » (p. 4)

Je n'entrerai pas ici dans le détail d'une analyse didactique. Je m'arrêterai seulement sur cette question : que peut-on dire de ces déclarations attribuées à une professeure de mathématiques ? Tout d'abord, redisons-le, le recueil de cet « exposé » (comportant une mise en abyme : la journaliste expose ce que la professeure lui aurait exposé) relève typiquement du paradigme du chasseur-cueilleur. Étant donné le média qui parle (un quotidien généraliste), on doit interroger l'authenticité de cet « exposé » : on peut juger vraisemblable que le texte ci-dessus, dont l'auteure est,

officiellement, la journaliste, soit une création de cette journaliste à partir de propos réellement proférés par la professeure y_0 plutôt qu'une version *ne varietur* de propos que celle-ci aurait réellement tenus. Mais cet exposé nous renseigne sur la société française, *même s'il avait été en partie inventé par la journaliste*. (Le propos prêté à y_0 selon lequel d'aucuns traiteraient les professeurs de mathématiques de fainéants pourrait par exemple passer pour apocryphe.) Cette société est telle que, dans un quotidien national connu, de centre gauche, orné de vestiges d'une ancienne idéologie soixante-huitarde, une journaliste peut présenter le texte ci-dessus comme recueillant les propos d'une certaine professeure de mathématiques trentenaire. Même si cette professeure semble singulière (on va voir pourquoi), son statut (de professeure de mathématiques) l'autorise à tenir un discours regardé *a priori* comme *légitime* sur les mathématiques et leur enseignement, bien que la force de ses propos soit minorée du fait de se situer à mi-chemin entre énoncé objectif et énonciation subjective. Quelle est cependant la singularité de y_0 – que l'on peut aussi bien regarder comme un personnage de fiction en partie créée par la journaliste ? L'héroïne de la journaliste semble mue par une pulsion caritative qui la porte à aider les « défavorisés ». C'est là que nous apprenons quelque chose de son rapport personnel aux mathématiques, $R(y_0 ; \mathfrak{M})$: à ses yeux, les mathématiques feraient partie de ces défavorisés ; dans la société française actuelle, les mathématiques « souffriraient ». Dans le même mouvement, l'héroïne se donne pour capable de « sauver » les mathématiques de ce mauvais sort. Notons que, étrangement, elle aurait pu choisir, lui fait-on dire, de « sauver » d'autres matières, comme si sa liberté avait été pleine et entière de choisir d'enseigner l'histoire ou le français, par exemple – élément biographique qui participe aussi de sa singularité. Mais une chose surtout doit être soulignée : la vision rédemptrice, hyperbolique, disproportionnée que confesse y_0 n'est pas, peut-on penser, celle du professeur de mathématiques « ordinaire », qui s'efforce simplement de faire de son mieux pour s'acquitter de sa charge. S'il en était ainsi, nous tiendrions, me semble-t-il, une découverte : le travail d'entretien de ξ avec des professeurs y_1, y_2, \dots, y_n de \mathfrak{M} , qui pourrait prolonger le « geste » supposé de la journaliste, mettrait-il au jour les mêmes thèmes – et notamment le désir héroïque de sauver les mathématiques ? (Notons qu'il en va autrement, certes, dans la noosphère, dont nombre d'acteurs, par ailleurs professeurs de mathématiques, disent d'une façon ou d'une autre travailler pour la gloire des mathématiques avant même de travailler pour la réussite des élèves.) Cela noté, la suite du propos fait écho à ce qui apparaît, au contraire, comme des « vérités » portées par la *civilisation* ambiante. La professeure y énonce en effet 1) que l'explication du comportement de x se trouve *dans* x ; et 2) que l'interaction adéquate de y_0 avec x pourrait modifier x d'une façon souhaitée. Comme souvent, on atteint au général par le truchement du particulier.

That's all, folks!
Je vous souhaite de bonnes vacances.

Annexe

Christine Buès, article « Mole », *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences* sous la direction de Dominique Lecourt (PUF, 1999/2003).

MOLE

La mole est la septième unité de base du système international d'unités. En 1971, elle a été officiellement définie avec la grandeur *sui generis* qu'elle mesure, la quantité de matière, comme « la quantité de matière d'un système qui contient autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes de carbone dans 0,012 kilogramme de carbone 12 ». Quand la mole est utilisée, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, ou d'autres particules ou des groupes spécifiés de telles particules (*Le système international d'unités* [SI], 1991, 6^e éd., BIPM, Sèvres). Cette définition présuppose une spécificité de la chimie qui traite d'une infinité de substances. Lorsqu'en 1687 Newton, dans la première « Définition » des *Principia*, désigne « la quantité de matière par les mots de *corps* ou de *masse* », il n'indique pas que la nature du corps doit être spécifiée. Newton définit des concepts pour la physique. En 1874, Van't Hoff, dans ses *Études de dynamique chimique*, note qu'une différence importante entre l'étude d'un équilibre physique et l'étude d'un équilibre chimique est « l'étonnante diversité des phénomènes chimiques ». Il s'ensuit qu'« en général la simplicité est moins grande, c'est pour cela que le terme de “système” a dû être substitué à celui de “corps” ». En conséquence, la masse ne convient plus pour donner la composition de ce système, il faut utiliser une quantité moléculaire. L'introduction des mesures physiques en chimie impose celle d'une unité, pour exprimer leurs résultats, qui lui soit spécifique.

Van't Hoff travaille dans les pas de Friedrich Horstmann et applique les lois de la thermodynamique aux transformations chimiques. Il a démontré qu'une substance en solution infiniment diluée, qu'il appelle idéale, se comporte comme un gaz parfait. Une solution est définie par la concentration des substances qu'elle contient. Dans l'étude expérimentale quantitative des solutions, les résultats des mesures ne sont exploitables que si la concentration est exprimée non pas en grammes par litre mais en quantité moléculaire, à savoir « le poids moléculaire exprimé en kilogramme dans le mètre cube ». Van't Hoff utilise les unités du système métrique qui se met en place, alors que ses contemporains vont plutôt mesurer cette concentration en poids moléculaire exprimé en grammes par litre, ce qui est rigoureusement identique à la proposition de Van't Hoff. L'expression du poids moléculaire, grandeur sans dimension à laquelle on accole une unité de masse, prend le nom de molécule-gramme. En 1883, Alexander Crum Brown, dans l'article « Molecule » de l'*Encyclopedia Britannica*; présente la molécule-gramme comme nécessaire pour exprimer « la constitution actuelle de la matière ». La molécule-gramme définie par C. Brown doit rendre compte « du très grand

nombre de molécules réelles », supposé mais indéterminé et des « poids moléculaires confirmés par les moyens chimiques ».

Au tournant du XIX^e et du XX^e s. le poids atomique relatif, grandeur sans dimension, devient molécule-gramme, molécule-livre ou molécule-tonne, selon que l'on a adopté le système métrique ou le système anglais, selon que l'on travaille dans un laboratoire ou dans une usine chimique. En 1893, Wilhelm Ostwald, lassé par la lourdeur et la diversité de ces termes mais conscient de l'utilité du concept, écrit dans son *Hand- und Hilfsbuch* : « Nous appellerons de façon générale "Mol" le poids en grammes numériquement égal au poids moléculaire d'une substance donnée. » En 1902, Alexander Findlay, traduisant les ouvrages d'Ostwald en anglais, fait apparaître « mole » avec cette graphie, de manière à conserver la prononciation allemande. C'est l'orthographe qui perdurera.

La mole ainsi définie est une unité mais que mesure-t-on en moles ? Les physico-chimistes travaillent à l'échelle macroscopique mais leur but est de « connaître les relations entre la constitution et les propriétés chimiques ». Van't Hoff pose comme principe au début des *Études* : « La marche d'une transformation chimique est caractérisée uniquement par le nombre de molécules, dont l'action mutuelle produit la transformation. » Le nombre de molécules qui réagissent à l'échelle microscopique est proportionnel au nombre de moles que le chimiste a mises dans l'éprouvette. Son facteur de conversion est la molécule-gramme qui va être rebaptisée masse molaire. Pendant plus d'un demi-siècle « le nombre de moles », un ersatz de grandeur, va servir à exprimer la « quantité de matière » d'un corps pur dans une réaction. Au niveau théorique, il est la variable chimique qui intervient dans l'expression du potentiel chimique défini par Gibbs (1876-1878) et du degré d'avancement d'une réaction défini par De Donder (1920). Mais en 1913, Jean Perrin a déterminé le nombre de molécules-particules que contient une molécule-gramme de corps pur. La mole n'est-elle plus dès lors qu'un nombre de molécules ? Dans ce cas, du point de vue métrologique, elle ne peut être l'unité de mesure d'une grandeur physique ; une mise en cohérence avec le système international d'unités, qui se construit, s'impose.

En 1901, Giovanni Giorgi a proposé d'ajouter au système « c.g.s. » (centimètre, gramme, seconde), une quatrième unité de base – l'ampère –, pour les mesures électriques. En 1960, faisant suite à l'idée de Giorgi de définir un système dont les unités de base sont le mètre, le kilogramme, la seconde et l'ampère (MKSA), le système international d'unités (SI) est adopté par la 11^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM). Un an après, physiciens et chimistes s'entendent pour adopter l'isotope 12 du carbone comme élément de référence dans la détermination des valeurs des poids atomiques. Les travaux du métrologiste allemand U. Stille et du thermodynamicien anglais E. A. Guggenheim sur le concept d'une grandeur chimique aboutissent. En 1957, Stille a proposé la définition d'une unité de mesure pour la chimie à la commission SUN

(Symboles Unités Nomenclature) de l'UIPAP (Union internationale de physique pure et appliquée) qui l'a communiquée à la Commission de chimie physique de l'UIPAC (Union internationale de chimie pure et appliquée). À la demande de ces instances internationales, en 1971, la quantité de matière fut introduite par la 14^e Commission internationale des poids et mesures (CIPM).

La durée d'un siècle environ qui sépare l'idée initiale d'Hortsmann d'une quantité moléculaire, de la mole unité de base du SI met en évidence la difficulté de donner le résultat d'une mesure en chimie. En mathématique, mesurer une grandeur c'est lui associer un nombre [$x = 3$]. En physique mesurer une grandeur c'est lui attribuer un nombre multiplié par une unité [$l = 3 \text{ m}$]. En chimie mesurer une grandeur c'est lui associer un nombre multiplié par une unité suivie du nom de l'entité impliquée dans la mesure [$n(\text{S}) = 3 \text{ moles (d'atomes de soufre)}$] (UIPAC, 1993, p. 41). L'entité est caractérisée par une formule qui indique sa composition stœchiométrique. On peut ainsi exprimer la mesure de toutes les substances chimiques. La molécule-gramme avait permis l'introduction des mesures physiques en chimie, la définition de la mole, comme unité de base du SI, permet la mise en conformité des mesures chimiques avec les règles de la métrologie. (pp. 652-653)