LES ATOMISMES

(Quelques remarques sur l'intervention en seconde en référence au programme de Physique Chimie)

Dominique Tyvaert, IA-IPR, académies de Nancy-Metz et Strasbourg
Langres, 23-25 septembre 2011

Introduction indications générales sur l'organisation de l'expérimentation

Développement :

I Remarques préalables sur le thème : les atomismes

1. Axes possibles pour l'interrogation.

2. L'univers de l'atome.

3. L'atomisme antique.

II La résolution d'un problème d'existence :

1. L'atomisme scientifique en chimie : les raisons d'une controverse.

2. L'expérience de Rutherford : l'expérimentation et le modèle.

3. Le tableau de Mendeleïev et l'a priori.

III une crise profonde d'identité :

1. La puissance d'explication par l'atome.

2. La décomposition de l'idée d'atome.

3. La disparition de l'objet élémentaire (délicat à aborder)

4. Le maintien de l'atome et l'objet de la physique.

IV *Annexes* : l'indéterminisme ; transition directe de 2 à 4 en III ; Bibliographie.

Lors du colloque pour cause d'un temps trop limité accordé à ces ateliers pédagogiques, de façon délibérée la première partie du développement n'a pas été traitée et les deux autres parties ont été très nettement allégées. ***Mais précisément cet allégement tout à fait réalisable (par exemple s'en tenir aux passages soulignés dans le texte qui suit, en ce qui concerne les trois moments de la partie II) est une opération de sélection absolument indispensable si l'on veut s'adresser à un public d'élèves de seconde et si l'on veut bien centrer sur l'élémentaire. Et rien n'interdit de n'envisager qu'une seule perspective sur trois ou cinq possibles, évoquées ici à tel ou tel endroit.***

INTRODUCTION : indications générales sur l'organisation de l'expérimentation

1. Je ne veux pas revenir sur ce qui vous a été dit et redit dans les ateliers précédents : je ne veux insister que sur deux points qui correspondent aux deux premières remarques de cette introduction. Il ne faut pas oublier qu'à côté de la modalité d'organisation N° 1, il y en a aussi deux autres et en particulier la modalité d'organisation N° 2, celle qui se déroule au sein de l'accompagnement personnalisé au titre d'une activité spécifique interdisciplinaire. Spécifique car il s'agit bien d'une intervention définie par une interaction singulière et réglée (cf. la circulaire de la DGESCO) quant à son contenu et à sa forme entre une discipline enseignée en seconde ou en première et la philosophie ; le cahier des charges concernant les thématiques s'applique ici tout autant qu'ailleurs. Notre discipline à partir de ce qui est dit et dans un rapport constant à ce qui est dit dans l'autre discipline, apporte **un éclairage complémentaire.** Cette intervention a pour but d'élargir les horizons d'un groupe d'élèves et de leur faire acquérir la pratique du mot juste, de la question judicieuse, de la distinction éclairante ainsi que la capacité à percevoir la portée générale ou les enjeux fondamentaux d'une question débattue. Je précise que cette modalité N°2 a été, pour plusieurs raisons assez contraignantes, le dispositif majoritairement choisi dans plusieurs académies.

Dans ce cadre là, les formes et la durée de l'intervention du professeur de philosophie ne peuvent pas être les mêmes que dans la modalité d'organisation N°1. L'on peut penser que la durée de l'intervention approchera ici le plus souvent de son maximum (une douzaine d'heures) et que même éventuellement avec un même groupe sur toute l'année trois (plus rarement quatre) connexions interdisciplinaires pourront être mises en œuvre et largement déployées. Mais dans les faits, la durée semestrielle est fréquente. Bien sûr **le lien avec le ou les professeurs de l'autre discipline reste fondamental, et rien ne peut être entrepris par le professeur de philosophie quant au cadrage général du projet éducatif sans l'accord du professeur de l'autre discipline** : cette collaboration est vitale. Mais la co-animation stricte, si elle peut se produire (sur la base par exemple d'une heure semaine accordée à chacune des deux disciplines) ne pourra pas être ici la règle ; elle n'est d'ailleurs pas exigée. Pour autant la co-animation n'est pas exclue ponctuellement ; le professeur de l'autre discipline pourra s'il le souhaite et autant qu'il le souhaitera intervenir dans l'heure d'accompagnement personnalisé prise en charge par le professeur de philosophie. Mais d'une façon générale, la relation interdisciplinaire absolument indispensable sera, dans le cadre de la modalité d'organisation N° 2, pour l'essentiel **externalisée** (en dehors de l'heure d'enseignement), en amont et en accompagnement de la mise en œuvre par le professeur de philosophie.

2. Dans cette intervention où les professeurs des deux disciplines s'instruisent mutuellement en fonction de leurs compétences propres, et cherchent ensemble à construire pour les élèves un supplément d'enseignement utile et efficace, il s'agit pour le professeur de philosophie **d'apporter un éclairage complémentaire dans le contexte très précis du programme d'une autre discipline.** Ce professeur doit poursuivre dans cette opération deux buts difficiles l'un et l'autre à atteindre :

a. exigence de faire apparaître et assimiler **un contenu de connaissances clair et précis avec bien entendu l'acquisition de la capacité à l'utiliser.** Pas question de multiplier des évocations plus ou moins érudites ou de se laisser aller à des discussions-débats très floues. Il m'apparaît comme essentiel de présenter des distinctions opératoires clés ou des renversements de perspective suggestifs ou des problèmes généraux bien identifiés ; les élèves doivent tirer un fruit déterminé de cette intervention ; ils doivent en sortir avec un savoir précis et une capacité plus grande en matière de pouvoir de compréhension de la réalité. Il faut dégager le fondamental… et apprendre aux élèves la capacité d'y parvenir, tout en leur donnant le goût de le faire… Ce n'est pas évident du tout.

b. exigence de capter un auditoire de jeunes adolescents et donc **exigence de grande élémentarité dans le propos.** La limitation du propos à des cibles bien délimitées en sachant s'attarder (un peu, pas trop longtemps) sur des étapes restreintes d'analyse ou de réflexion afin **d'avancer pas à pas**, est ici une chose essentielle. Mais plus encore, il convient de présenter les idées et de mobiliser l'esprit des élèves en assumant un enseignement vivant, amusant, surprenant, percutant. Ne pas hésiter à utiliser l'image, le schéma, le texte court, l'exemple frappant, l'analogie suggestive, le registre narratif et descriptif ; une bonne anecdote peut avoir un effet pédagogique certain. Mais tout cela implique d'être particulièrement inventif.

Bref il faut et l'image et le concept, et l'idée pertinente et le mot juste. Il faut les idées clés ou les interrogations essentielles…, mais aussi le récit passionnant ou l'accompagnement visuel saisissant. Ce registre a en fait un nom ; c'est la rhétorique philosophique —si bien mise en œuvre à tel ou tel moment par Platon dans les dialogues précisément exotériques…— rhétorique qui n'exclut pas mais au contraire rend possible au-delà d'elle mais au sein d'elle —par fragment— une pensée authentiquement telle. Au demeurant, le souci de simplicité radicale ne s'oppose pas nécessairement à la quête de la plus grande pertinence possible, puisque le fondamental correspond souvent à ce qu'il y a de plus élémentaire.

3. Dans le cas précis d'un rapport avec une science dure, la physique, au niveau de la classe de seconde, le professeur de philosophie est confronté à une double difficulté : la présence d'une part d'un discours très précis dans son contenu et parfaitement univoque dans son langage, discours que l'on se doit d'assimiler, et d'autre part, pour cause de progressivité délibérément organisée en physique, l'aspect – pour nous professeur en terminale – apparemment très réduit de l'information présentée.

D'après les manuels de physique consultés il est question d'abord de la découverte du noyau de l'atome avec **l'expérience de Rutherford** décrite assez précisément et généralement resituée de façon succincte dans le contexte très large d'une histoire de l'idée d'atome. Puis il s'agit d'une caractérisation « sommaire » de **la structure de l'atome** : un noyau chargé positivement autour duquel tournent des électrons chargés négativement. Les nucléons dans le noyau [protons et

neutrons, éléments incomparablement plus lourds que l'électron] donnent **le nombre de masse** global de l'atome ; d'autre part les protons fournissent **son numéro atomique** [le nombre de protons étant équivalent au nombre d'électrons qui eux déterminent les spécificités chimiques ; en effet les charges électriques positives et négatives doivent s'équilibrer dans l'atome pour que celui-ci soit un corps neutre électriquement]. Le numéro atomique est la caractéristique essentielle qui permet de comprendre la classification des éléments chimiques dans **le tableau de Mendeleïev** ; ce numéro détermine le rang dans la classification. Si l'on ajoute **une définition des ions** qui correspondent à une modification de l'atome lui conférant une charge positive ou négative selon que l'atome est doté dans sa structure périphérique d'électrons en moins ou d'électrons en plus, nous sommes arrivés à la fin du chapitre. Quel développement complémentaire pouvons-nous apporter sur la base d'un contenu apparemment aussi réduit ? A vrai dire ce contenu restreint a au moins l'avantage de pouvoir être facilement assimilé par tous, ce qui facilite considérablement le traitement de la première difficulté. En revanche, une question semble s'imposer à première vue : que peut-on ajouter à ce propos scientifique au contenu très délimité et très précis (comme il se doit depuis la réglementation en vigueur dans la Royal Society dès sa fondation) et enfin remarquablement auto-suffisant, puisque sa signification semble s'épuiser totalement dans la formulation symbolique qui est la sienne ? Ne sera-t-on pas tenter de produire des considérations par trop extrinsèques : à l'inverse de la simplicité flagrante de l'enseignement du professeur de physique, le professeur de philosophie se lancerait dans des développements érudits multiples et complexes, où il se transformerait le plus souvent - à tort - en archiviste de théories spéculatives périmées.

4. En fait comme nous le formulerons au début de notre développement, cette base restreinte suffit pour déployer des opérations de clarification ou d'interrogation philosophiques et offre en son contenu même des possibilités d'intervention. Cela dit pour des raisons d'efficacité pédagogique et pour, me semble-t-il, faciliter la tâche des deux catégories de collègues concernés**, il me faut prendre deux initiatives qui semblent au départ me faire nettement dévier du but à atteindre :**

a. Faire dans mon propos d'aujourd'hui un peu plus de physique qu'il n'en faudrait (une bonne part sera en fait assumée par le professeur de physique lui-même - dans son enseignement - bien plus compétent que moi en la matière ; on ne doit pas faire de la physique à la place du professeur de physique) pour mettre un peu plus à l'aise des collègues philosophes qui par hypothèse ont besoin d'informations dans un domaine qu'ils ne connaissent pas forcément très bien….Ce n'est qu'ensuite que dûment instruit on peut mettre en place des remarques philosophiques strictement contextualisées.

b. Déborder un peu le cadre du programme de physique en seconde (alors que dans l'expérimentation nous devons pour l'essentiel nous y tenir vis-à-vis des élèves eux-mêmes et ne pas bouleverser une progressivité voulue par les professeurs de physique) afin de ne pas mettre en difficulté involontairement les collègues physiciens. Il est en effet souhaitable que le philosophe n'installe pas - sans s'en rendre compte - sur le monde atomique et subatomique des perspectives qui viendraient ensuite faire obstacle au développement ultérieur du programme de physique. Certaines idées qui circulent sont tout simplement irrecevables.

Dans ce qui suit **j'ai choisi de présenter des pistes de réflexion —parmi d'autres—** pour montrer

qu'il est possible d'assumer le projet expérimental pour ce thème précis en respectant les deux exigences évoquées dans le point N°2. Bien entendu, les pistes que j'ai retenues ne sont exclusives d'aucune autre…mais j'ai voulu montrer que finalement il y avait de quoi faire, si nécessaire. Bien entendu aussi, toute piste ne pourra être pratiquement retenue par un professeur de philosophie que si, au terme d'un dialogue soutenu, elle fait l'objet d'un accord avec le professeur de physique partenaire dans l'expérimentation**. S'il devait y avoir des défaillances en physique dans mon propos, par avance je présente mes excuses aux collègues physiciens et j'accepte évidemment tous les rectificatifs nécessaires. Ceci est un document de travail qui fait office de brouillon.**

I. REMARQUES PREALABLES SUR LE THEME: LES ATOMISMES.

1. LES AXES POSSIBLES D'UNE INTERROGATION:

Deux approches philosophiques sont à l'évidence possibles ; en cette phase exploratoire, formulons ces approches dans toute leur radicalité, **quitte à revenir ultérieurement à une formulation nécessairement plus ramassée et surtout beaucoup plus simple :**

a. **Une approche ontologique sur l'atome : qu'en est-il de la structure fondamentale de la matière ?** La matière physiquement parlant est-elle ultimement indivisible ? D'une façon plus générale, une structure fondamentale de la matière existe-t-elle réellement et peut-on parler d'elle dans les termes de l'ontologie classique ? Dans la mesure où l'atome correspondrait à ce qui est « consistant » dans le réel matériel, à quoi correspond exactement cette « consistance » qui serait l'objet même des sciences physiques ? En termes plus généraux, qu'est-ce qui dans la matière « persiste » ou encore qu'est ce qui en un sens large dans la matière « résiste » ? Si tant est qu'on puisse définir par ces deux termes de façon sommaire ce qui constitue une réalité extérieure à l'esprit humain ou ce qui fait que les phénomènes physiques peuvent être considérés légitimement comme constituant un réel stable et connaissable. Mais si l'on prend en considération l'objet de la physique contemporaine des particules élémentaires (niveau subatomique), peut-on encore parler pour les phénomènes matériels d'un substrat immuable et même peut-on encore parler tout simplement d'objet ? Si « les relations » sont le nouvel « objet » des sciences physiques, de quelles relations s'agit-il ? Dans ce cadre, faut-il renoncer à toute ontologie ? Si avec ce primat des « relations » la notion classique puis surtout contemporaine de « champ » devient un concept dominant, ne faut-il pas reconnaître que le tout prime la partie et dépouiller la « particule » discontinue d'une grande partie de ses privilèges ontologiques (ce qui ne revient pas à promouvoir radicalement le champ classique continu car dans la physique contemporaine , le champ classique continu n'est pas plus privilégié que la particule ; c'est en un sens nouveau –contemporain et quantique - que le champ doit être ici envisagé) ?

b. **une approche épistémologique : qu'en est-il de la physique atomique comme connaissance scientifique ?** Quel rôle joue l'expérimentation dans la constitution de cette connaissance : point de départ décisif déclenchant et orientant les recherches ou mise en œuvre de « la vérification après coup » d'affirmations déduites au départ de façon purement théorique ? Quel statut faut- il accorder

en science à ce qu'on appelle un « modèle » théorique : anticipation rigoureusement exacte de la réalité ou fiction provisoire n'ayant qu'un but heuristique ? S'il n'y a pas en ce qui concerne l'univers des particules élémentaires de substrat immuable voire même d'objet, de quoi parle la science physique ? Quel est, au sens réduit de corrélat, « l'objet » des sciences physiques qui dégagent bel et bien des propositions universelles et nécessaires ainsi que des invariances ? Quelle signification faut-il accorder au glissement sémantique du mot « atome » au mot « particule élémentaire » ? Comment se fait-il que des grands physiciens ne puissent s'empêcher de parler, fût-ce provisoirement, d'une quête de la « réalité ultime » ; cette dernière expression est-elle ici sensée ? La théorie physique doit-elle abandonner toute prétention au « réalisme » et se contenter de « sauver les phénomènes » ? L'abandon contemporain en physique de tout modèle visualisable de l'atome est présenté comme structurel et indépassable ; comment expliquer cette situation et comprendre ce qui la justifie en droit ?

On pourrait y ajouter **une troisième approche de type gnoséologique** : y-a-t il absence totale de relation (séparation complète des horizons) entre spéculation philosophique et recherche scientifique, même s'il ne saurait être question de remettre en cause l'autonomie épistémologique de la science ? Faut-il résolument cantonner la philosophie à ne représenter qu'un âge dépassé de la réflexion rationnelle, construction verbale purement imaginaire sans aucune valeur cognitive ? Faut-il que l'activité du grand savant en tant que telle soit considérée comme dénuée de toute dimension spéculative à caractère plus ou moins philosophique ? Plus particulièrement l'emploi d'un même mot - « atome » - en philosophie et en science est-il dénué de toute signification ? Mais cette troisième approche présuppose des connaissances sur la science et sur la philosophie ; elle représente donc un problème nettement moins accessible au niveau de la seconde. **Nous ne rencontrerons cette troisième perspective que de façon succincte et latéralement**.

Mais revenons au contexte très précis du chapitre consacré à l'atome dans le programme de physique en seconde ; il y est question d'une découverte implicitement fracassante : l'atome, terme précis inventé par les anciens, existe réellement…mais aussi cet atome est composé de plusieurs éléments séparés les uns des autres et l'on apprend par ailleurs qu'il est au moins modifiable dans sa structure périphérique. En conséquence de quoi une problématique simple peut être ici formulée :

N'y-a-t-il pas un paradoxe de l'atome au moment de sa découverte en physique ? Personne ne conteste plus son existence, alors qu'il n'est plus clair du tout qu'il mérite son nom…son identité semble d'emblée au moins partiellement perdue. Au moment même où l'on proclame son existence, l'on doit reconnaître qu'il ne correspond plus à son essence. Que faut-il donc entendre par existence et nature de l'atome en physique ?

Et ce paradoxe se redouble, puisque malgré cette perte d'identité qui va s'aggraver très rapidement au fil des découvertes du début 20° siècle, l'on persiste néanmoins à user du mot atome sans éprouver aucun malaise à cet égard ! Et l'on arrive même à cet ultime paradoxe de l'existence de particules plus élémentaires que l'atome, lequel originairement par définition - l'insécable - ne peut-être que ce qu'il y a de plus élémentaire. Comment convient-il de comprendre l'usage du mot « atome » et du mot « particule élémentaire » en physique ?

Deux interrogations plus particularisées peuvent alors être formulées :

Pourquoi cette expérimentation de Rutherford a-t-elle marqué et bouleversé les esprits ? Quelle est la portée exacte de l'expérience de Rutherford et de l'interprétation qu'il en donne ? En quoi l'existence de l'atome faisait-elle problème à l'époque et pourquoi a-t-elle été combattue par une majorité de scientifiques un siècle durant ?

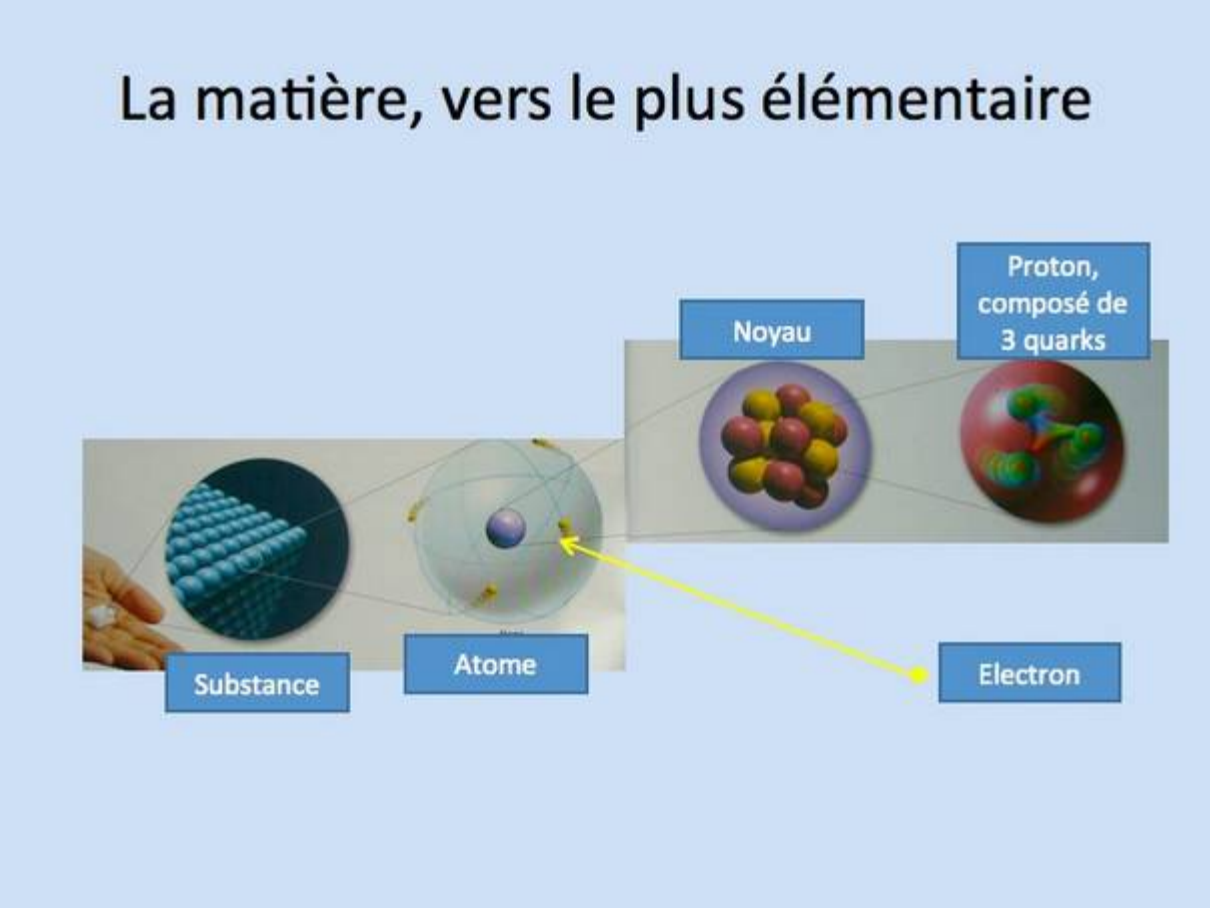
Quelles sont les caractéristiques de l'atomisme qui disparaissent une à une, dès le modèle de Rutherford ? En quoi, en cette physique contemporaine, la perspective atomiste au sens strict serait détruite dans son principe même ? Comment concevoir la notion physique actuelle d'atome en ayant perdu la relation à l'atomisme antique originaire ?

Mais avant de traiter ces interrogations générales et particulières dans les parties II et III, et précisément pour pouvoir le faire convenablement , il me paraît indispensable de s'assurer que l'on dispose d'informations claires, précises, adéquates et disons un peu plus complètes sur le monde de l'atomisme physique et sur l'atomisme antique comme système philosophique.

2. L'UNIVERS DE L'ATOME EN PHYSIQUE

Les caractéristiques générales complètes et les proportions extra-ordinaires du minuscule

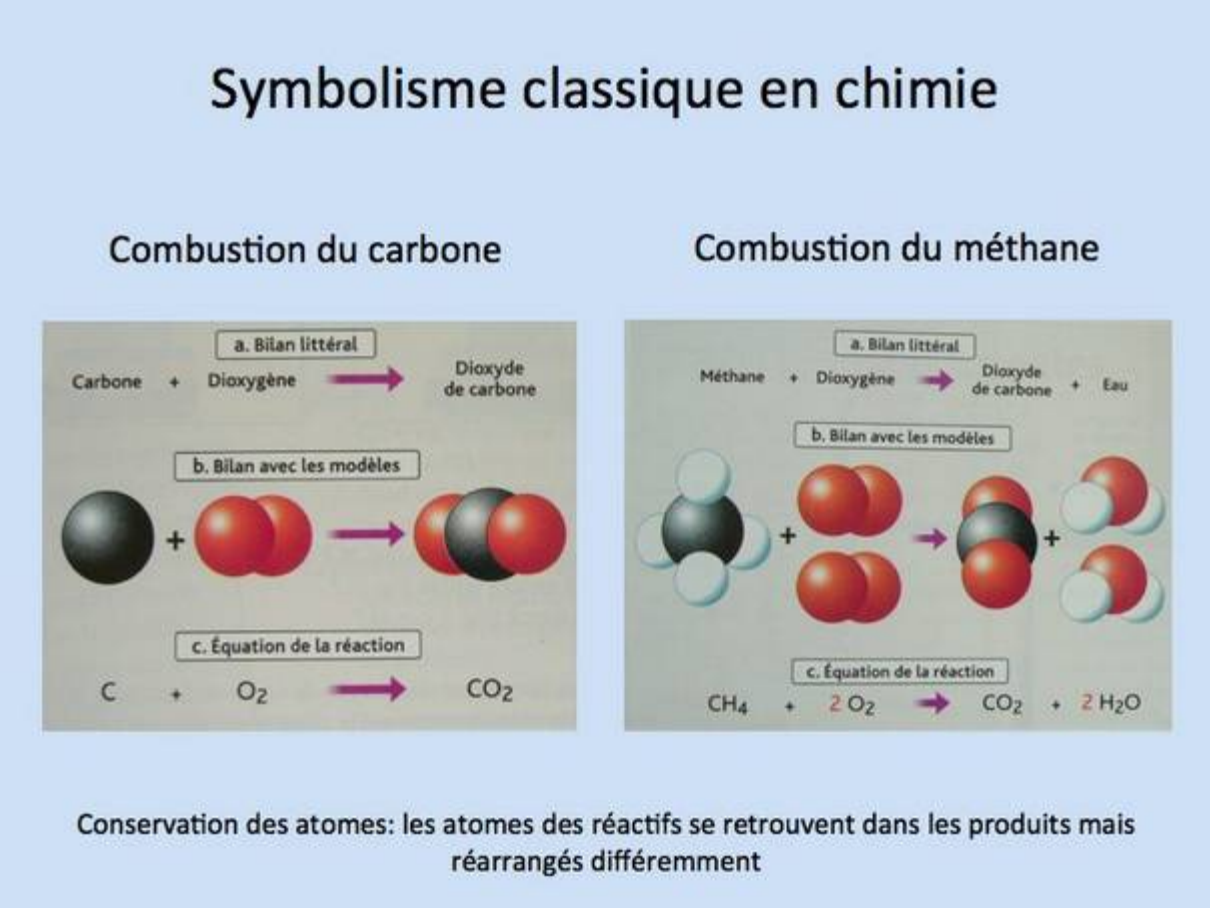
Nous comprendrons ici par univers de l'atome, l'atome et les particules élémentaires qui le composent. Et **nous nous situerons au départ au niveau des représentations courantes et d'une opinion assez communément partagée pour voir quels sont les effets induits par la structure de ces représentations et le vocabulaire à l'œuvre dans cette opinion**.



A partir de notre culture générale et de celle aussi des élèves, l'on pense tout simplement que l'atome (et ce qu'il contient) c'est le plus petit élément de notre monde et l'on considère que les atomes sont les fondements mêmes de notre univers physique habituel emprunt d'ordre strict et immuable. Les schématisations qui vulgarisent souvent avec beaucoup de clarté les acquis de la science nous installent subrepticement dans un monde global caractérisé par **la continuité au sens d'homogénéité des formes d'être**. Implicitement l'on doit retrouver dans le petit la même logique que dans le grand….c'est un même monde dont on doit pouvoir parler de la même manière….à l'échelle près .**Ce serait tout simplement et uniquement du beaucoup plus petit.**

Notons tout de même au passage que l'expression de « beaucoup plus petit » est elle tout à fait juste : si l'on pense à de minuscules petites billes en ce qui concerne l'atome. Il suffit de faire la comparaison avec une goutte d'eau de 30 mm3. Pour atteindre la dimension d'une molécule, il faut diviser 7 fois par 1000 son volume !

Diapositive N°3 :



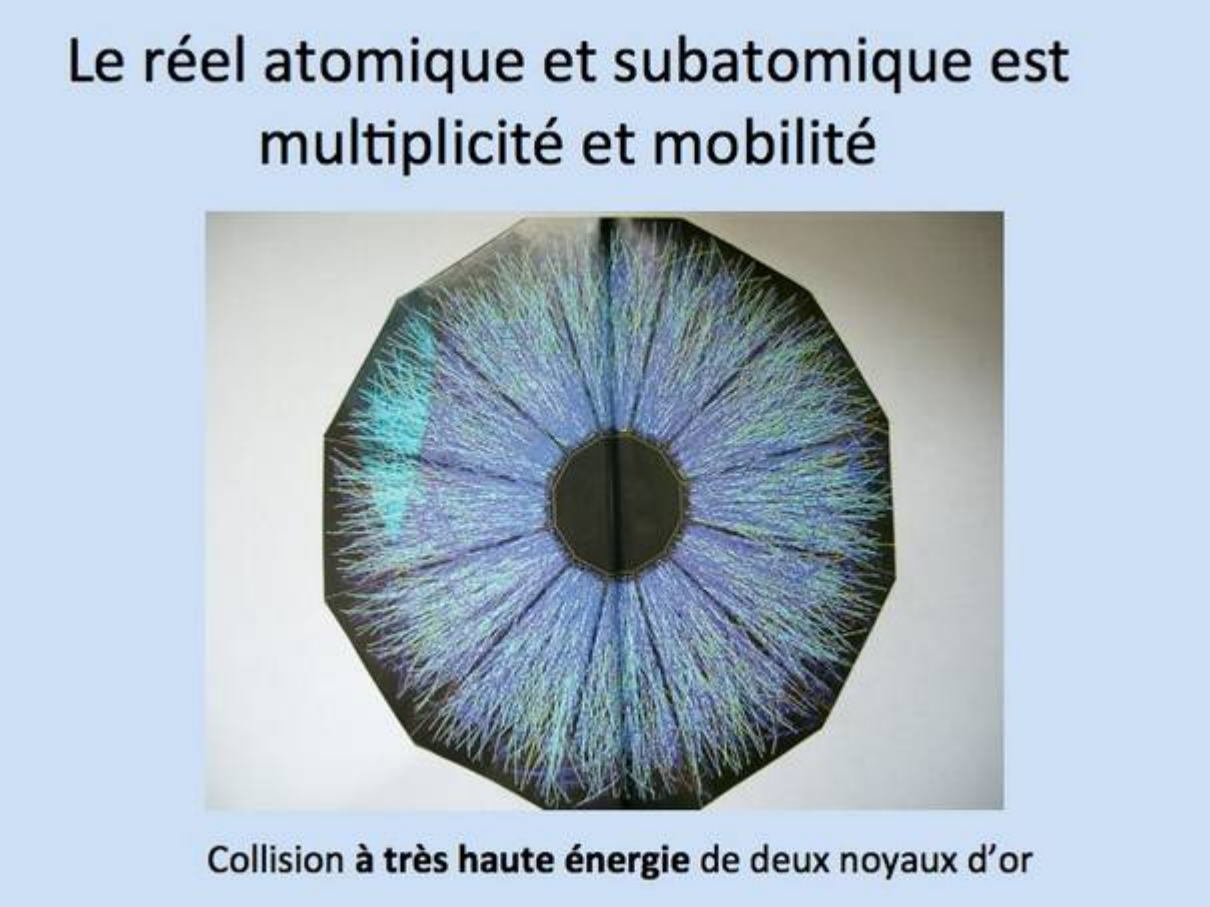
Comme tout le monde a quelques rudiments de chimie et précisément les élèves de seconde aussi après leur programme de quatrième, la notion d'atome est aussi associée à **une idée de stabilité et de conservation** avec en sus l'idée d'un domaine universellement réglé **en différentes séquences relativement isolables, localisables, finies et individualisées d'enchaînement causal bien déterminé** ; l'association de certains atomes en un lieu et à un moment donnés débouchent sur les mêmes éléments combinés autrement ; tel ou tel atome à sa place dans une association donnée concourt à un résultat final parfaitement prévisible à partir des données de départ.

Il me semble ici (diapositives 2 et 3) que l'obstacle figuratif (la représentation imagée des niveaux de réalité physique et la figuration symbolique des réactions chimiques) et l'obstacle sémantique (notion **d'infiniment petit** et principe de **conservation de la quantité de matière** avec des **éléments chimiques de base irréductibles les uns aux autres**) polarisent notre attention sur certaines caractéristiques justifiées, mais du coup **occultent** d'autres aspects au moins aussi essentiels quand on veut caractériser complètement l'univers de l'atome **: l'incroyable multitude…** et **la mobilité extrême** d'une part…. et d'autre part **la mutabilité possible** des réalités atomiques et subatomiques dans un cadre qui correspond plutôt à **des transmutations d'éléments** et à **des effets globaux de foule** non déterminables de façon individuelle.

De ce fait, entre l'atome… et le monde physique ordinaire que nous connaissons quotidiennement, il n'y a pas une simple différence de degré et une parenté profonde ; il y a en fait une différence de nature et une étrangeté radicale. En d'autres termes, **l'univers de l'atome ce n'est pas l'élémentaire**

de notre monde ordinaire mais c'est plutôt un tout autre monde (que le nôtre) pas élémentaire du tout.

Pour symboliser ceci en une image frappante voici la diapositive N°4 :



Cette image représente les effets d'une collision de noyaux d'atomes d'or. Grâce à des systèmes de marquage de trajectoires des particules (systèmes installés à l'endroit où la collision est prévue, parce qu'artificiellement produite), l'on y voit « l'explosion » en particules très diverses qui résulte de cette collision. Nous devons d'abord absolument souligner que cette « explosion » se produit dans des circonstances exceptionnelles : **uniquement à de très hautes énergies**… sans aucune commune mesure avec la situation ordinaire de notre monde. Mais tirons maintenant quelques leçons de cette image :

a. On laissera de côté **la première leçon** —pourtant fondamentale— mais à mon avis beaucoup trop difficile à exploiter en classe de seconde. Ce que l'on voit ici ce sont des effets expérimentaux qui dépendent autant du système de détection que du produit de la collision elle-même. Aussi bien notre connaissance scientifique ici porte plus (et porte toujours ainsi) sur l'expérimentation d'une réalité que sur la réalité seule elle-même, c'est ce qu'on appelle **l'inséparabilité de l'objet minuscule (la particule élémentaire dite ultérieurement quantique)** ; il n 'est jamais séparable des conditions de son expérimentation. Nous n'y reviendrons pas.

b. On s'attardera sur les autres leçons, à commencer – **seconde leçon** - par une impression violente

de **multitude quasi innombrable pour un décompte ordinaire** ….et il ne s'agit dans cette image que de deux noyaux ! Il me semble ici opportun de rappeler quelques chiffres significatifs qui nous permettront de mesurer à quel point « l'atome est foule » selon une expression heureuse de Bachelard….et il est vrai qu'en présence d'une foule, l'on a une impression d'innombrabilité. Nous revenons donc ici au niveau atomique stricto sensu.

Dans le moindre bout de mines de crayons on ne trouve pas moins de mille milliards de milliards d'atome de carbone.

Dans une goutte d'eau, il y a mille milliards de milliards de molécules d'eau, qui sont chacune composées de trois atomes.

Dans un gramme de gaz d'hydrogène, 600 000 milliards de milliards d'atomes (dans des conditions normales de température et de pression).

c. troisième leçon**, la mobilité extraordinaire** des particules et aussi des atomes : on peut dire que les lignes bleues de notre image frappante renvoient à des déplacements de particules qui se font à très grande vitesse. Donnons donc quelques chiffres concernant les mouvements se produisant dans ce que j'ai appelé l'univers de l'atome.

En une seconde l'électron (prenons l'unique électron de l'atome d'hydrogène dans le modèle de Bohr) fait quelque chose comme dix millions de milliards de tours autour du noyau atomique ; sa vitesse est de 2200km par seconde.

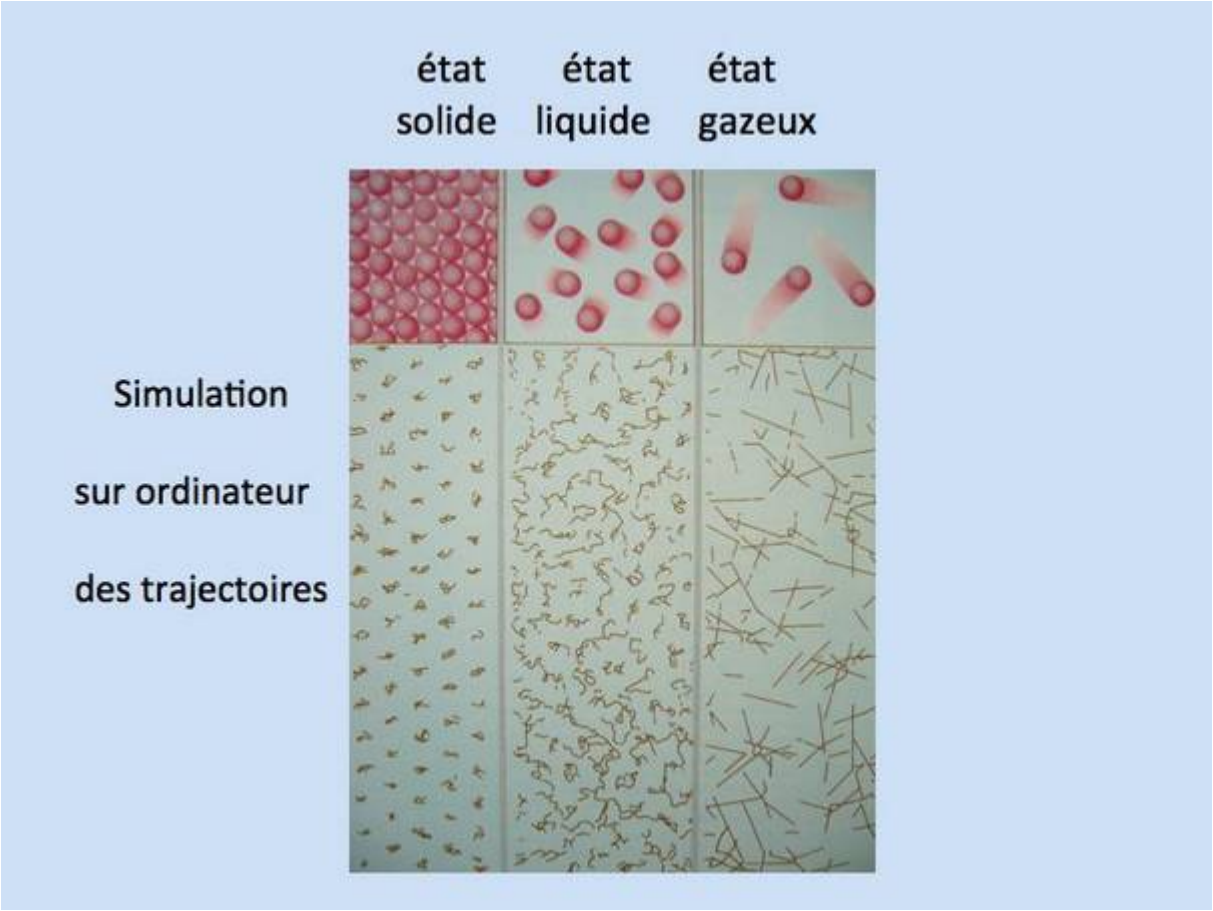
La vitesse de propagation d'une particule alpha, type de rayonnement radioactif émis par le noyau d'un atome – nous en reparlerons plus loin –oscille entre 10 000 et 42 000 km par seconde.

Dans le mouvement brownien – mouvement de particules en suspension à la surface d'un liquide (mouvement des grains de pollen à la surface d'une goutte d'eau ; mouvement dont nous reparlerons plus tard et qui est d'ailleurs évoqué dans certains manuels de 4°) – les molécules (groupement défini d'atomes liés entre eux) qui sous-tendent ce mouvement, se déplacent à quelques milliers de km heure…c'est déjà du rapide pour nous !

d. Quatrième leçon**, la transmutabilité indéniable** des noyaux de l'atome. Pour faire court, l'on peut dire qu'ils se désintègrent en une multiplicité d'autres particules… et d'une façon générale un noyau peut donner naissance à d'autres noyaux (nous y reviendrons plus loin en mobilisant tous les aspects de l'expérience de Rutherford). On peut aussi noter que les particules produites ont souvent une durée d'existence extraordinairement courte… L'élémentaire physique ne se range plus exclusivement du côté du stable, mais aussi du côté de l'éphémère : une advenue à l'existence qui cesse aussitôt. **Peut-être faudra-t-il commencer à considérer le stable comme un éphémère qui dure ?** Peut-être, pour définir le régime d'existence de la réalité physique, devrait-on remplacer la référence fondamentale à l'immuabilité par une référence exclusive à la muabilité constante et intégrale : en quelque sorte, passer d'une logique parménidienne à une logique bergsonienne (à la structuration mathématique près qui n'est pas rien…. et qui pose bien sûr un grave problème par rapport à la pensée de Bergson) ; renversement de perspective que l'on retrouve à l'œuvre dans la philosophie, dûment instruite scientifiquement, de Whitehead**. Le devenir (ou plutôt le processus)**

se substituerait à l'être comme catégorie fondamentale de la réalité. Tout au moins peut-on se poser la question. Mais nous laisserons de côté pour le moment cette caractéristique fondamentale là ; nous y reviendrons succinctement au cours de la troisième partie.

e. Pour confirmer sans appel et récapituler les deux remarques centrales b et c, prenons la diapositive N°5 :



Dans **l'état gazeux**, les atomes non reliés ne cessent de se déplacer dans tous les sens. Cela ne nous étonne guère.

Mais l'on voit que **même dans l'état solide, plus exactement dans les cristaux**, les atomes étroitement reliés, vibrent autour de leur position de telle façon qu'en moyenne ils restent au même endroit. Là nous sommes étonnés… en fait il semble bien qu'absolument rien dans la nature n'échappe à la logique « multitude en mouvement ».

Ainsi donc l'univers de l'atome ce sont des populations immenses d'entités, sans commune mesure avec nos multitudes ordinaires, et ce sont des mouvements permanents extraordinairement rapides. Ces deux derniers aspects ne doivent pas être ignorés pour mieux comprendre la référence que la physique dans son développement fait à la notion d'atome, dont chacun savait qu'elle avait été déployée et définie originairement par l'atomisme antique. Celui-ci en effet ne parle pas seulement d'éléments premiers insécables, il parle tout autant d'une infinité d'atomes en état de constant mouvement plus ou moins rapides… avec de multiples collisions ou associations entre eux.

Pourquoi insiste-t-on moins sur ces deux caractéristiques que sur celle de petitesse ? Probablement pour partie parce que nous sommes en présence de caractéristiques certes concevables mais irreprésentables dans un quelconque modèle aisément visualisable. Au nom de quoi cependant l'irreprésentabilité schématique serait-elle une preuve indiscutable d'irréalité ? Avec la physique atomique et subatomique, les physiciens découvriront en effet un peu plus tard que la « réalité élémentaire » se dissocie en fait radicalement de la représentation intuitive classique spatio-temporelle.

f. **Négliger ces deux aspects revient en outre à oublier les travaux des physiciens du 19° siècle sur l'état gazeux (et finalement début 20ème siècle sur l'état liquide)** , travaux qui ont ouvert la voie à l'atomisme scientifique au moins autant que les travaux de bon nombre de chimistes, ce qu'il ne faut pas ignorer **même si on ne pourra pas s'attarder sur ce point dans l'expérimentation pédagogique.**

Il n'y a pas en effet que **Dalton** et beaucoup de chimistes après lui, pour donner une nouvelle carrière à l'idée ancienne d'atome, il y a aussi ceux qui ont inventé et développé la mécanique statistique, dans le cadre de la théorie cinétique des gaz. Après Newton qui avait défendu la nature ultimement corpusculaire de la matière, Euler et Bernoulli (18ème siècle) ont pensé que les propriétés des gaz pouvaient parfaitement être expliquées par le mouvement des corpuscules matériels élémentaires. Mais dans cette perspective, c'est **Maxwell (19ème siècle) qui va créer la mécanique statistique en étudiant les gaz.** Puisqu'il s'agit d'étudier des populations immenses, ce très grand savant va transposer et considérablement raffiner les méthodes qui permettaient d'étudier les caractéristiques de l'homme moyen (les mensurations en particulier) pour étudier - dans le même esprit - les caractéristiques de la vitesse des molécules dans un gaz (la molécule est le plus petit constituant, composé d'atomes, d'un gaz donné ou plus généralement d'un élément chimique donné). En d'autres termes il ne s'agira pas seulement d'identifier la valeur moyenne mais de déterminer comment les vitesses se distribuent statistiquement autour de cette valeur moyenne, de manière à prédire le mouvement réel dans toute sa complexité. Mais **ainsi tout sera ramené aux mouvements de petites sphères dures ou encore de points matériels correspondant à ce que nous appelons l'atome ou la molécule** (tout petit ensemble réglé d'atomes). Par exemple comment comprendre qu'une odeur quelque part se répande assez lentement dans toute une pièce assez vaste, alors qu'on pense que les molécules du gaz en question (par exemple l'ammoniac) devraient se déplacer très vite dans un espace essentiellement vide au sens courant. En fait chaque molécule de gaz peut se heurter aux autres molécules de ce même gaz, mais surtout elle va se heurter aux innombrables molécules d'air qui peuplent tout l'espace de la pièce .Il en résulte un nombre invraisemblable de collisions qui retardent énormément la progression. Cette progression correspondra donc à une ligne presque constamment brisée particulièrement contournée, le contraire d'une propagation rapide en ligne droite.

Un peu plus tard **Boltzmann (fin 19ème siècle)** parviendra dans ce même esprit – en usant là aussi d'équations mathématiques passablement complexes – à expliquer par le mouvement des molécules de gaz, le second principe de la thermodynamique, comme quoi il y a augmentation tendancielle de la quantité d'entropie pour un système isolé. Ce grand savant fut convaincu par ses succès théoriques brillants que l'atome qui n'était encore qu'une hypothèse commode pour Maxwell était une réalité avérée. Mais il se heurtera néanmoins à l'opposition très violente d'une majorité de

physiciens. Ce fut, semble-t-il, l'une des causes de son suicide. « Je suis, écrira-t-il, conscient de n'être qu'un faible individu luttant contre le courant de l'époque » Nous reviendrons plus loin sur les raisons de cette violente opposition.

Quand enfin (**au début 20ème siècle) Perrin** étudia expérimentalement en France les différents aspects du mouvement Brownien (mouvement défini en c.) en exploitant un article célèbre d'Einstein, il mobilisait ici – pour l'état liquide cette fois ci - la même logique explicative que ces deux grands prédécesseurs et bien sûr qu'Einstein lui-même.

La convergence de toutes ces études expérimentales très différenciées et de fait d'y dégager par le calcul toujours une même constante à quelques décimales près (le nombre d'Avogadro) fut le facteur décisif qui conduisit Perrin et la communauté scientifique internationale à accepter la réalité de la molécule (et donc aussi celle de l'atome en tant que composant de la molécule).

L'on voit ici qu'avant les différents modèles d'atome proposés par les physiciens**, il y avait en science deux atomistiques ; celle de quelques physiciens spécialistes en mécanique statistique (cinétique des gaz et des liquides)… et celle d'un bon nombre de chimistes**. L'on doit même dire que **la découverte de la réalité de l'atome, même si l'on ne sait dans ce cadre là que très peu de choses à son sujet, a eu lieu bien avant l'expérience de Rutherford… avec les expériences de Perrin.**

Mais il est évident qu'en raison du contenu des programmes de physique en 4° et en 2° et du degré de complication considérable de la mécanique statistique, il serait tout à fait inapproprié de faire un détour complet par la cinétique des gaz et des liquides**… Il convient plutôt de se contenter d'un détour limité sur les états non solides en général et sur le seul mouvement brownien (voir plus loin III 1 b) ; il est même sans doute réellement opportun de le faire si l'on ne veut pas passer sous silence des aspects essentiels de l'atome…** et certaines raisons pour lesquelles l'on a repris ce concept né dans le cadre de l'atomisme antique. C'est ce à quoi nous nous tiendrons dans la suite de cet exposé.

3. **L'ATOMISME ANTIQUE**

Les caractéristiques indiscutablement connues d'une conception strictement métaphysique

1. A mon avis deux orientations doivent d'emblée être retenues :

Il va sans dire qu'il ne faut surtout pas confondre **doctrine des éléments** et **doctrine atomiste**. Les « physiciens antiques » qui sont plus des philosophes que des scientifiques malgré le caractère positif de certaines de leurs remarques (en particulier ceux que l'on appelle les physiciens d'Ionie) se sont tous intéressé au problème de la nature d'un état premier de la matière ; mais **l'atomisme au sens strict** renvoie à une seule tradition qui affirme que **toute la réalité se ramène exclusivement à deux principes premiers : les atomes (insécables) et le vide (intangible),** deux réalités correspondant chacune à une innovation conceptuelle audacieuse et radicale….Tout survol comparatif de la physique antique est donc ici complètement déplacé.

Mais il faut à mon avis restreindre encore plus le champ de réflexion. Pour une triple raison, il

convient —me semble-t-il— de ne prendre en référence que la tradition épicurienne :

a. Nous ne disposons pas de traces absolument directes et fiables pour la physique (au sens restreint) de Démocrite (sans parler de celle de Leucippe). Et les témoignages indirects donnent lieu à des interprétations souvent divergentes…et à des débats assez subtils...

b. La liaison qui sera établie entre la science et l'atomisme antique dès le 17° siècle (et largement pour les siècles suivants) se fera souvent - mais non exclusivement - sur la base de la pensée d'Epicure et de Lucrèce, la seule vraiment connaissable. Newton et Boyle calent largement leur réflexion en se confrontant au cartésianisme et à l'épicurisme.

c. Les rares témoignages concernant Démocrite sont —indépendamment des problèmes d'interprétation— pédagogiquement beaucoup moins accessibles que des passages issus des œuvres d'Epicure et de Lucrèce

On peut bien sûr mentionner que le mot « atome » remonte à Leucippe et Démocrite, mais honnêtement il me semble aventureux d'en dire plus. Et il me paraîtrait inapproprié d'évoquer des hypothèses très élaborées sur le sens véritable de leurs raisonnements.

2. Pour aborder de la façon la moins abrupte possible la pensée atomiste épicurienne, l'on peut adopter deux stratégies au choix :

Mais je précise auparavant qu'on laissera de côté, pour les raisons susdites, l'étude du texte bien connu d'Aristote « De la génération et de la corruption » I, 2 où ce philosophe restitue un raisonnement par l'absurde de Démocrite, comme quoi les corps ne peuvent pas être divisés à l'infini. Ce passage me semble trop abstrait pour des élèves de seconde, surtout si l'on souhaite pouvoir se faire comprendre par la totalité des élèves, c'est-à-dire aussi par l'élève faible pourvu qu'il soit de bonne volonté.

a. Soit étudier avec les élèves le passage de la lettre à Hérodote que présente **la diapositive N° 6 opération pédagogiquement assez réaliste.**

LETTRE A HERODOTE EPICURE

- Le tout est formé des corps et du vide : car l'existence des corps nous est garantie plus que tout le reste par le témoignage des sens eux-mêmes, témoignage dont il faut partir pour porter sur l'invisible les conjectures du raisonnement. Quant à ce que nous appelons le vide, l'étendue ou la nature intangible, s'il n'existait pas les corps n'auraient ni où résider ni à travers quoi se mouvoir, comme il est évident pourtant qu'ils se meuvent…//…
- En outre parmi les corps, on distingue les composés et ceux dont sont faits les composés. Ceux-ci sont insécables (atoma) et immuables ; et il le faut si l'on ne veut pas que tout se résolve en non-être ; mais qu'il y ait quelque chose d'assez résistant pour demeurer intact dans les dissolutions des composés ; ils sont essentiellement pleins, de sorte que la dissolution ne sait par où ni comment les prendre. Il en résulte nécessairement que les éléments premiers insécables sont les natures des corps….//…
- Le tout est infini quant au nombre des corps et quant à la grandeur du vide…//…
- Ce qui vient d'être dit..//.. fournit un type suffisant pour modeler d'après lui nos idées sur la nature des réalités existantes. 39 à 41 puis 45

Dans ce passage, deux arguments sont successivement présentés : **primo,** il est nécessaire de penser l'existence du vide, sinon les mouvements permanents et les positionnements des réalités naturelles constatables à l'œil nu dans l'univers ne pourraient pas exister. Il faut bien en effet que le mouvement et la localisation des corps soient rendus possibles par un espace vide où ils peuvent se produire et s'inscrire (on assimilera ici le vide à « l'espace vide de tout » au sens courant) **; secundo**, il est nécessaire de penser l'existence de l'atome, faute de quoi le monde des corps, dont chacun constate l'existence, ne pourrait pas exister. Si en effet, il n'y a pas de limite infranchissable à la friabilité des réalités matérielles, rien ne pourrait en quelque sorte se tenir dans l'existence, tout ne pourrait que se défaire complètement et l'on aboutirait au néant total.

On notera ici l'alliage singulier de constat et de spéculation pure qui caractérise les raisonnements d'Epicure, en parfaite cohérence avec ce qu'il affirme, puisque le vide strictement intangible et les atomes absolument minuscules ne peuvent en aucun cas être constatés par nos sens. Nous reviendrons plus loin sur cet alliage, qu'Epicure souligne lui-même dans ce passage, en mobilisant le mot « invisible » pour bien faire apparaître la nécessité d'une pure spéculation.

On pourra à titre d'exercice demander aux élèves de noter les caractéristiques de l'atome présentées par ce texte : insécable, immuable, plein, en nombre infini. On pourra aussi y ajouter pour information d'autres caractéristiques : doté de dimensions (ou grandeurs), ayant un nombre indéfini de configurations déterminées (ou formes), caractérisé par une masse, capacité à s'associer plus ou moins durablement à d'autres atomes. On pourra encore faire noter qu'implicitement les corps

composés et même un monde dans son ensemble (assimilable à une galaxie) naissent et meurent…..On pourra enfin s'interroger sur la nature du vide, affirmée infinie en fin de texte ; qui est ni le néant ni un corps, mais qui néanmoins existe et même à une nature ; comment comprendre les mots « étendue » et « intangible » ?

b. soit reproduire de façon simplifiée la logique à la fois ionienne et parménidienne qui gouverne les options fondamentales de l'atomisme antique aussi bien chez Epicure que chez ses prédécesseurs (pour autant qu'on le sache). Ici il faut disposer de beaucoup de temps.

Le point de départ est dans le constat de deux phénomènes massifs – qui semble dominer totalement ce que nous appelons la nature – **d'une part le changement** (ou le devenir) et plus particulièrement le mouvement qui affectent toutes réalités naturelles… et **d'autre part la persistance** de l'univers global dans son existence et dans certaines de ses configurations qui réapparaissent régulièrement sous la même forme (la permanence des espèces).

Il convient sans doute d'abord d'indiquer aux élèves que, dans une approche fort ancienne du réel extérieur, la nature n'est pas vue à travers le regard d'une mentalité transformée par les connaissances scientifiques (où l'on pense que tout est structure nomologique) et où même les notions générales d'ordre et de stabilité (et encore celle de cosmos remarquablement organisé ce qui n'est pas —on le sait— équivalent) ne prévalent pas du tout. Au bord ou au dessus d'une mer qui ne cesse de changer dans sa couleur ou dans la forme de son agitation (il faut évoquer avec les élèves notre propre expérience commune d'un océan contemplé), en dessous d'un ciel instable et imprévisible dans ces configurations (même l'ordre parfait dans les étoiles ne s'imposera qu'avec l'astronomie et plus lentement qu'on ne le croit), au sein d'une condition physique humaine très fragile et très précaire (les grecs ont une conscience aiguë de la vulnérabilité de tout homme ; l'homme est essentiellement un mortel soumis aux aléas de l'existence), un observateur tout à fait réaliste et honnête de l'ancien temps peut légitimement être persuadé que tout se modifie constamment et que tout à l'instar des plantes et des animaux, des alternances du jour et de la nuit et des saisons, est amené à naître et à mourir, dans une sorte de mouvement perpétuel plus ou moins rapide de génération d'êtres plus ou moins fugaces. Comme chacun sait, le sens étymologique du mot grec nature (*phusis*) est « ce qui pousse au jour, ce qui fait advenir au jour ». Nos premiers physiciens – les penseurs d'Ionie – avaient par exemple bien vu que l'eau s'évaporait en air ou que les nuées se transforment en pluie ou que des solides frottés se transforment en flammes puis en fumée… et ils s 'étaient interrogés sur l'ordre des transformations en question. Notons au moins que leur constat de départ d'une métamorphose généralisée des états et des formes de matière n'est pas dénué de réalisme et ne correspond pas à des emballements de l'imagination. N'importe quel observateur ne disposant d'aucune culture scientifique ou se décidant artificiellement à en faire abstraction peut soutenir spontanément ce genre de constat fondamental.

Il importe ensuite de souligner **que les deux phénomènes massifs susdits plongent l'homme qui réfléchit et qui cherche à connaître les choses dans un profond embarras : ils engendrent en effet successivement deux paradoxes.** Le premier paradoxe en lien avec les deux constats massifs, s'impose immédiatement. **Si - radicalement - précarité ontologique il y a (tout corps plus ou moins complexe finit par s'éroder, se défaire et même par disparaître), comment se fait-il que le monde persiste et revient en quelque sorte toujours sous des formes comparables ?** Comment un monde –

ainsi caractérisé - peut-il avoir une durabilité pour nous indéfinie ? Mais il y un second paradoxe - plus fondamental - en rapport avec le seul premier constat massif. Il peut se formuler ainsi **: s'il y a changements incessants, comment peut-on accéder à une connaissance authentiquement telle des phénomènes naturels ?** Car connaître réellement une chose ce n'est pas seulement en parler, la décrire ou l'évoquer, c'est être capable d'attribuer à une chose des caractéristiques constantes et c'est être en rapport avec une chose réellement existante. Or apparemment il n'y aurait aucune constance véritable dans la forme des phénomènes observés, pire on peut se demander souvent si ce que l'on observe existe sinon réellement tout au moins durablement et correspond donc à une existence permanente que l'on puisse indéfiniment viser (et sur laquelle on peut stocker utilement des indications fiables). En conséquence de quoi aucune connaissance authentiquement telle des phénomènes naturels ne serait possible…si l'on en reste aux termes de ce constat premier. Deuxième paradoxe redoutable !

En fait, nous sommes ici en présence – pour ce second paradoxe - des exigences logiques imposées par la pensée de Parménide. On peut en effet présenter cette pensée philosophique d'une façon simple qui ne trahit en rien son orientation fondamentale et qui n'oublie pas d'en exhiber la logique interne**. Quelle pourrait être la voie que doit suivre « une science » qui voudrait être absolument « dure » ?** Une telle science dont le discours ne varierait jamais (penser ici à l'exemple des mathématiques) ne peut porter que sur des existences permanentes et même sur les formes constantes de ces existences permanentes. En termes plus simples encore, **on ne peut connaître vraiment que le stable et la connaissance véritable consiste à reconnaître explicitement sa stabilité déterminée.** Parménide dira en des termes très ramassés et très abstraits que le seul chemin autorisé pour accéder à une connaissance véritablement connaissance c'est de ne parler que de « ce qui est » au sens absolu de ce terme (aucun passage partiel ou complet au non-être) et que de dire à son sujet « qu'il est toujours ce qu'il est ». Ce n'est pas une pure tautologie sans intérêt, c'est l'identification de la structure fondamentale du seul discours théorique qui serait absolument légitime. Au demeurant, **ces exigences parménidiennes elles-mêmes correspondent tout simplement aux présupposés fondamentaux de ce que nous appelons encore la connaissance objective et rationnelle des choses**. N'est-il pas vrai que la science depuis les grecs (à commencer par les mathématiques et l'astronomie), repère et formule des propriétés immuables et des relations invariantes et nous montre imperturbablement pourquoi il en est nécessairement ainsi ?

Epicure adopte face à ces exigences très radicales – parmi d'autres solutions cohérentes possibles, exploitées d'ailleurs par les philosophes des autres traditions - la position suivante **; tous les êtres observables (plus ou moins complexes au demeurant) qui ne cessent de varier… sont en réalité composés d'êtres premiers, eux-mêmes incomposés et absolument inobservables.** Tous les changements ou variations correspondent à des modifications dans la composition ou même à la dissolution complète de cette composition. Les êtres premiers incomposés eux ne peuvent absolument pas varier ou se dissoudre, en raison même de leur « incomposition »… ils sont immuables et éternels. **Ces êtres absolument stables et insécables, les atomes, « sont » au sens fort de ce terme et peuvent faire l'objet d'une connaissance véritablement connaissance.** Et les compositions faites à partir des atomes, en ceci qu'elles sont liées aux atomes et donc qu'on en parle en termes d'atomes, peuvent aussi par ce biais être objet de connaissance véritable. **Voilà donc une solution élégante et cohérente qui permet de régler aussi bien le second paradoxe – on vient de**

voir comment - que le premier. Car enfin **la nature indestructible des atomes empêche la dissolution totale de toutes choses et mieux sert de point de départ constant à des processus de recomposition.** Des collisions entre atomes peuvent résulter - pas toujours mais souvent - des associations et ces associations prennent alors inévitablement certaines formes spécifiques du fait que la forme déterminée des atomes se combinant **commande activement** telle ou telle forme spécifique de la combinaison seule possible et relativement stable. P.M. MOREL souligne bien ce rôle en quelque sorte actif des atomes, trop souvent méconnu, débouchant sur une « nature » régulièrement constatée des êtres composés. Insistons un instant sur la dérivation de toute réalité composée à partir des composants élémentaires ; **cette stricte dérivation du tout à partir de l'élémentaire est le seul mode d'explication légitime pour déterminer une constance, une régularité ou encore une « nature » au niveau des êtres composés** et elle implique pour les atomes une pluralité différenciée : **il faut nécessairement au départ un très grand nombre de formes distinctes d'atome pour rendre compte de toute la série des compositions relativement stables mais très déterminées possibles**. Pour chaque forme d'atome distincte, il devra en outre y avoir une infinité d'atomes individuels pour être la condition de possibilité d'une pluralité de mondes qui ne cessent de naître , de durer, et de mourir…pluralité de mondes au demeurant nécessairement infinie.

Pour essayer d'être complet sur la structure fondamentale de l'atomisme épicurien, il convient d'ajouter deux remarques sur des points délicats**.**

Primo, chaque atome isolément et originairement est affecté d'un mouvement de chute vertical dans le vide en raison de sa masse ; mais il est aussi doté d'un pouvoir spontané de déclinaison – le clinamen : une sorte de libre arbitre élémentaire - qui explique au départ les inévitables collisions entre atomes et les associations qui peuvent en résulter. Cette doctrine de la pesanteur et du clinamen n 'était pas – apparemment - présente dans les conceptions primitives de Démocrite et Leucippe. Ces deux aspects combinés en outre n'ont jamais été pris en compte par les physiciens ou chimistes de la science classique (strictement déterministe) qui ont remobilisé les notions d'atome et de vide (pour la science contemporaine très largement quantique, voire la note en annexe sur l'indéterminisme ; aucun physicien n'a repris explicitement le clinamen). On peut simplement penser **que l'atomisme métaphysique dans ses articulations centrales présuppose un mouvement incessant des atomes,** pouvant aller dans n'importe quelle direction puisqu'il se déploie dans le vide et qu'il en résulte des chocs ou des regroupements. Il est vrai cependant que sur ce point du mouvement les critiques d'Aristote vont être très vives et ont leur cohérence….et que le modèle strictement épicurien est une tentative de réponse à ces critiques. Doit être mentionnée ici l'idée que **ce mouvement originaire est conçu comme extraordinairement rapide,** plus rapide que la lumière ; car celle-ci est freinée par la résistance de l'air, alors que le mouvement des atomes se déployant dans le vide n'est freiné strictement par rien.

Secundo, si l'atome correspond strictement à l'idée parménidienne d'être au sens fort, on peut légitimement se demander ce qu'il en est pour le vide. Dans la perspective atomiste, le vide n'est pas le néant ; du néant d'ailleurs on ne peut rien dire, si ce n'est qu'il n'est pas et en ce sens il ne saurait être en aucune façon le corrélat d'une quelconque science dure authentiquement telle**. Mais si l'on doit dire du vide « qu'il est » et mieux qu'il a une « nature » (cf la lettre à Hérodote), que faut-il entendre par là ?** Sans doute faut-il comprendre en première approximation, que le vide existe de

façon permanente et que sa nature est d'être dénuée de toute caractéristique tangible ; il n'est que « pure extension » et en ce sens assimilable à un espace pur débarrassé de toute réalité qu'il pourrait contenir. Cependant qu'en-est-il exactement de cet espace pur ? Cette question est épineuse, mais nous la laisserons de côté.

3. Il apparaît alors que l'atomisme antique est strictement **une métaphysique** et même mieux constitue de façon exemplaire **un système métaphysique**.

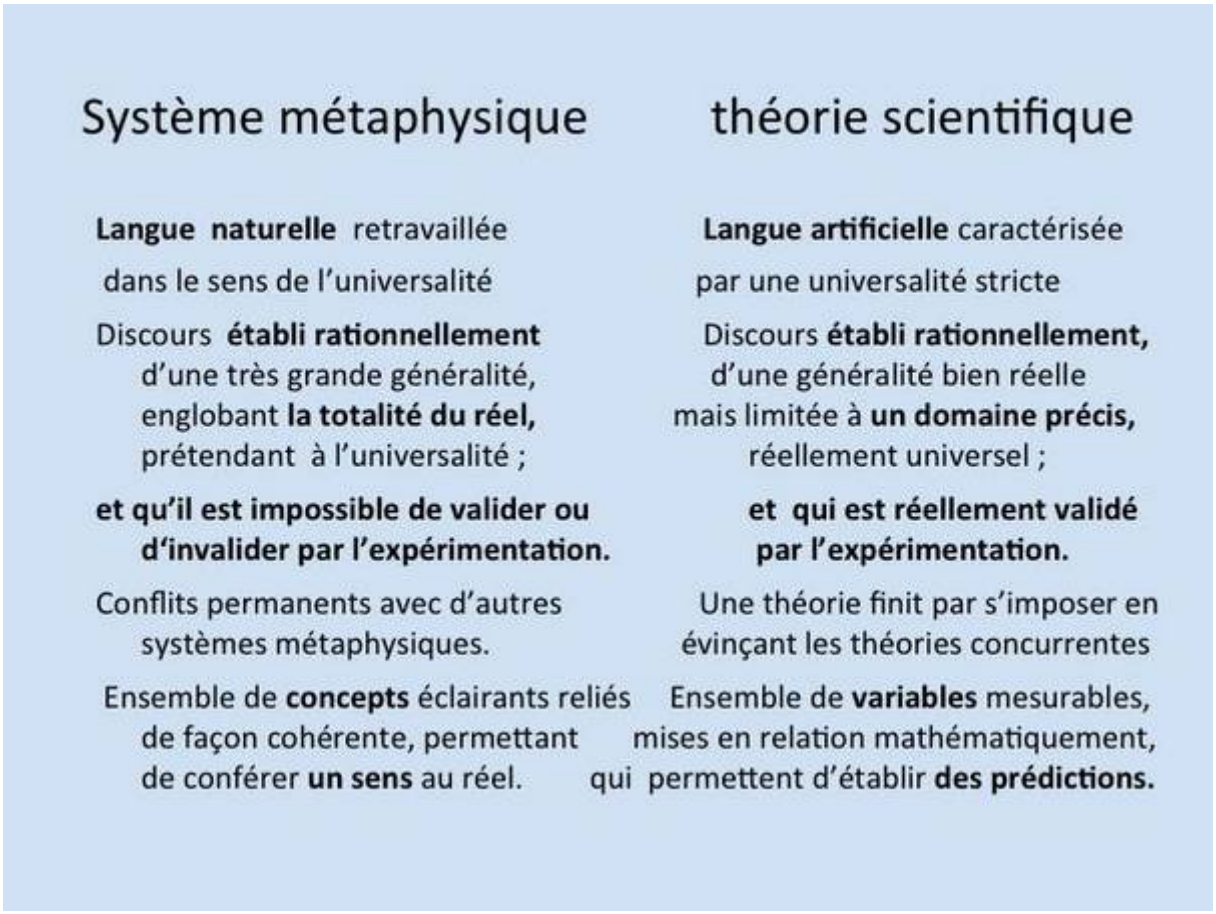
Il s'agit de raisonnements purs (très souvent des raisonnements par l'absurde), certes compatibles avec des données sensibles au départ, mais débouchant sur des affirmations strictement invérifiables expérimentalement au dire des atomistes eux-mêmes. **Le concept d'atome – absolument minuscule – et le concept de vide – absolument intangible – ne sont pas principiellement conciliables pour les philosophes atomistes eux-mêmes avec une quelconque expérimentation directe.**

Certes, par ailleurs, la tradition philosophique atomiste en général n'est pas exempte de telle ou telle inflexion ou innovation (on en a parlé au sujet du clinamen), mais Epicure et ses disciples sont contemporains de l'avènement de la pensée systématique en philosophie ; le mot même « système » émerge dans la langue philosophique de cette époque. A la vérité, l'épicurisme est une sagesse constituée qui ne souffre pas de modifications dans son architecture conceptuelle et de fait aucun disciple ne se permettra de mettre en cause les paroles d'Epicure ; c'est incontestablement la tradition la plus stricte à cet égard.

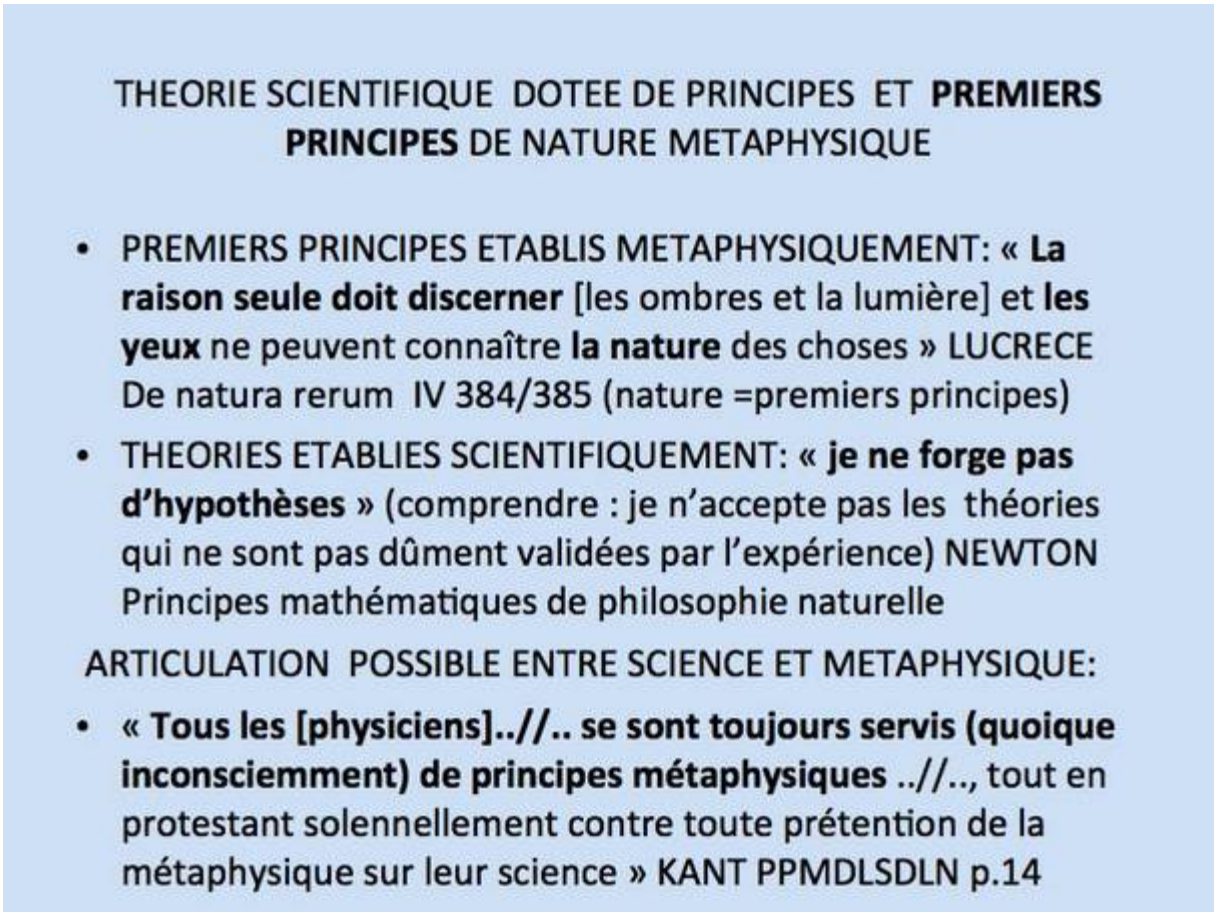
Au-delà même de cette dernière remarque historique, avec les textes de la tradition épicurienne **nous sommes en présence, comme toujours en métaphysique, d'un modèle explicatif du réel et d'une manière de s'interroger sur le réel —parmi d'autres— qui transcendent —comme les autres— les époques**. Tantôt mobilisés tantôt négligés… peu importe… ces modèles apparaissent comme dotés d'une grande cohérence et comme indéfiniment exploitables… Au niveau des premiers principes où tout modèle comme celui-ci se situe, il peut toujours être discuté…. mais il échappe structurellement au verdict de l'expérimentation en raison de la nature principielle des réalités qu'il vise ; il peut donc toujours servir au moins à orienter la pensée (et par là à justifier ou non certaines conduites ou certains choix). A ceci près qu'il ne faut pas s'enfermer dans le statut de vérité unique et définitive revendiquée par la tradition épicurienne, c'est bien cette fonction de modèle explicatif qui est assumée par Epicure lui-même dans la lettre à Hérodote (cf. la fin du passage sélectionné).

4. Puisqu'avec ce thème, la confrontation ou mise en relation entre discours métaphysique et discours scientifique est inévitable, il convient sans doute de proposer une différenciation des deux types de discours sans préjuger des articulations plus fines qui peuvent être développées dans un sens ou dans un autre.

Tel est l'objectif visé par la **diapositive N° 7** dans le tableau comparatif qu'elle propose. Ce tableau n'exige pas un développement de ma part. **On peut se contenter fort bien de trois traits distinctifs au lieu de cinq.**



Rien n'interdit pour autant d'indiquer qu'il y a un au-delà de la grande différence (spéculation pure/ validation expérimentale), différence que l'on peut condenser en des formules de LUCRÈCE et de NEWTON. A condition de bien noter parallèlement que la métaphysique ne rejette pas le constat sensible bien établi dont il lui faut toujours tenir compte et que la science en construction se doit de proposer des hypothèses audacieuses au-delà de toute expérience avant de s'imposer la règle de toujours en chercher la validation expérimentale. Ce qui au demeurant ne trahit en rien la pensée de ces deux auteurs cités. Personne ne peut en effet contester qu'historiquement, des physiciens se sont préoccupés de considérations métaphysiques pas seulement en aval mais aussi en amont ou en accompagnement de leurs recherches proprement scientifiques. C'est au fond ce que constate KANT, même s'il analysera à sa manière dans un certain système de pensée cette relation entre science et métaphysique. Disons simplement que ce constat peut être fait sans aborder et trancher la question de savoir comment articuler précisément la nature de cette relation. CARNAP affirme aussi l'existence de cette relation mais dans sa pensée elle prendra un tout autre sens. Tel est le sens de la **diapositive N° 8**



5. Concluons ce développement en délimitant bien et en appréciant rétrospectivement la portée théorique de la pensée atomiste épicurienne.

. Tous les aspects qualitatifs du réel (odeur, couleur, etc ..) sont ramenés principiellement à des aspects quantitatifs ou géométriques (grandeurs, configurations). Mais il est absolument exclu à cet égard d'atteindre des mesures précises et vérifiées expérimentalement.

. Les phénomènes naturels relèvent d'une pure mécanique qui n'obéit à aucune finalité intrinsèque ou extrinsèque ; l'argument de la meilleure forme ou organisation possible est irrecevable. Tout raisonnement mobilisant les causes finales est congédié.

Sur ces deux premiers aspects susdits la pensée épicurienne, malgré sa spécificité métaphysique, est indéniablement très proche de la physique nouvelle du 17° siècle.

. Le rejet de toute référence à un ordre harmonieux immuable et global qui pourrait venir justifier l'idée d'une intervention et donc d'une suprématie ordonnatrice **divine**, a conduit à un rejet de la seule science de la nature qui commence à se constituer comme telle dans l'antiquité : l'astronomie. Contester le caractère divin des astres est une initiative évidemment bienvenue, mais rejeter simultanément pour des raisons athéologiques, l'idée d'orbe circulaire pour les planètes est une initiative malheureuse. Pour les pythagoriciens, pour Platon et pour Aristote, l'ordre parfait des

étoiles appelle le plus parfait des mouvements qui est circulaire !... cette intuition ne se réduit pas à une divinisation des astres effectués par certains (au moins par les pythagoriciens…)

. La physique moderne mobilise l'idée d'une législation parfaite de tous les phénomènes naturels par des lois universelles et éternelles. Ce point-ci de la physique moderne ne me semble pas compatible avec l'idée de mondes certes structurées par des régularités récurrentes (des types d'assemblages spécifiques) mais qui sont des mondes à ordre global particulier, possiblement imparfait quant à l'harmonie formelle et finalement transitoire quant à l'ordre qui y règne et qui assure leur existence….même si des mondes de même type ne sont pas impossibles et peuvent se reproduire. Il y a ici chez Epicure une prévalence de l'élémentaire matériel sur le lien légal, largement à l'opposé de ce qui prévaut au début de la science classique.

Sur ces deux derniers aspects susdits la pensée épicurienne n'a pas pris la même direction que la physique nouvelle qui se retrouvera plutôt en compagnie de la pensée platonicienne renouvelée, laquelle imposera donc l'idée capitale d'un ordonnancement mathématique immuable, parfait et connaissable de tous les phénomènes naturels.

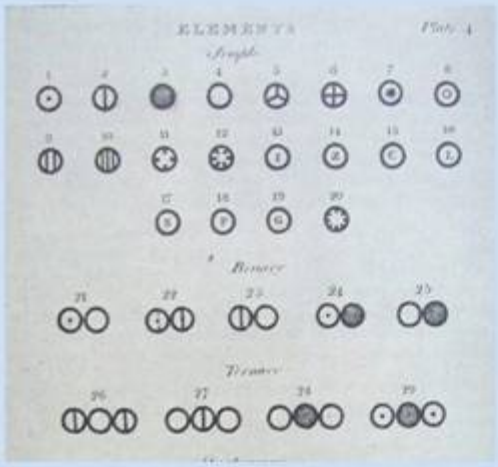
II UN PROBLEME D'EXISTENCE : LA RECONNAISSANCE D'UNE EXISTENCE LONGTEMPS CONTESTEE

De l'innovation théorique, de l'hypothèse, de l'expérimentation et du modèle en théorie scientifique

1. L'atomisme utilisé en fait, mais radicalement contesté en droit : vifs débats en chimie et en physique au 19ème siècle.

Diapositive N° 9

Conception atomiste de Dalton, 1807



EXPLANATION OF THE PLATES. 219

PLATE IV. This plate contains the arbitrary marks or signs chosen to represent the several chemical elements or ultimate particles.

Fig.		Fig.		
1	Hydrog. its rel. weight	1	11 Strontites	46
2	Azote,	5	12 Barytes	68
3	Carbone or charcoal,	5	13 Iron	38
4	Oxygen,	7	14 Zinc	56
5	Phosphorus,	9	15 Copper	56
6	Sulphur,	13	16 Lead	95
7	Magnesia,	20	17 Silver	100
8	Lime,	23	18 Platina	100
9	Soda,	28	19 Gold	140
10	Potash,	42	20 Mercury	167

21. An atom of water or steam, composed of 1 of oxygen and 1 of hydrogen, retained in physical contact by a strong affinity, and supposed to be surrounded by a common atmosphere of heat; its relative weight = 8
22. An atom of ammonia, composed of 1 of azote and 1 of hydrogen 6
23. An atom of nitrous gas, composed of 1 of azote and 1 of oxygen 12
24. An atom of olefiant gas, composed of 1 of carbone and 1 of hydrogen 6
25. An atom of carbonic oxide composed of 1 of carbone and 1 of oxygen 12
26. An atom of nitrous oxide, 2 azote + 1 oxygen 17
27. An atom of nitric acid, 1 azote + 2 oxygen 19
28. An atom of carbonic acid, 1 carbone + 2 oxygen 19
29. An atom of carburetted hydrogen, 1 carbone + 2 hydrogen 7

Dans cette diapositive renvoyant au livre intitulé « *New System of Chemical Philosophy* », l'on voit comment **J.DALTON** au début 19ème siècle identifie les premiers atomes correspondant aux corps simples (il symbolise chaque atome par une petite sphère) ; les corps composés et au premier chef l'eau renvoie à des associations d'atomes (pour l'eau : oxygène et hydrogène N°21… on notera au passage que DALTON écrit en fonction des connaissances de son époque HO, alors que c'est HOH). Il s'agit bien sûr ici d'une schématisation très sommaire, où de surcroît l'atome est réduit à une seule caractéristique : la masse. Mais cet atome, qui est bien tout à la fois minuscule et inaltérable, rentre ici dans le champ du quantitatif précis, même s'il n'est pas directement expérimentable. Le but sera de donner pour chaque atome une masse et pour toute combinaison un nombre pour les atomes spécifiques concernés. Ainsi pour le gaz carbonique N°28, Dalton ne se trompera pas sur le nombre: OCO ; 1 pour le carbone et 2 pour l'oxygène. Le raisonnement qui a conduit Dalton à ce choix théorique en faveur de l'atome est simple. Les chimistes ont constaté depuis longtemps que dans un corps composé intervient en termes de masse une proportion constante dans les composants. On peut donc induire que cette composition renvoie comme fondement explicatif à des particules ultimes ou atomes se combinant de façon constante tout en ayant chacune une masse atomique spécifique. Apparaît ici un lien fondamental entre la caractéristique identifiant certains atomes et certaines propriétés chimiques ; nous sommes avec DALTON dans une conception qui pense le réel fondamental en termes de pluralisme et de différences irréductibles, comme dans l'atomisme antique. Cependant puisqu'il est impossible d'appréhender et de peser chaque atome, on prendra comme unité l'atome du corps apparemment le moins lourd (l'hydrogène) et l'on établira la masse

des autres atomes relativement à lui. Ainsi sera établie une classification entre les différents atomes. Il sera néanmoins difficile de discerner la masse exacte pour chaque atome correspondant à un élément chimiquement caractérisé, car on ne dispose généralement que d'**une information** de départ pour déterminer **les deux inconnues** (les deux aspects quantitatifs susdits : la masse propre à chaque atome et le nombre d'atomes de même espèce dans la combinaison de base) et les règles générales de combinaison que Dalton croit avoir devinées pour s'appuyer sur des informations complémentaires ne sont pas appropriées.

Mais ce raisonnement que nous considérons rétrospectivement comme génial a suscité des objections absolument catégoriques pendant tout le 19° siècle. Autre chose est d'affirmer que pour une composition chimique il y a, par exemple au niveau du gramme, des proportions définies, autre chose est d'affirmer qu'il existe réellement à un niveau encore inférieur et même nettement inférieur des particules absolument élémentaires ; tel est le discours de ceux qui se refusent à franchir ce pas. Mais il faut bien noter ici que cette opposition va venir ici des savants eux-mêmes qui mettent ici en avant des principes qui à leurs yeux régulent la démarche scientifique elle-même.

Quand en France de grands chimistes comme J.B. DUMAS et M. BERTHELOT interdisent qu'on use de la notion d'atome, ils font triompher leur point de vue au sein de la communauté scientifique française. Les deux arguments mobilisés sont connus, puisqu'ils ont été d'abord exprimés par A.COMTE : 1) la science ne doit prendre en considération que des variables observables et par là mesurables 2) la science doit se contenter de mettre en relation des variables ; elle ne doit pas chercher des causes profondes. On doit viser le « comment » et non le « pourquoi » ! Or l'atome évoqué par les hommes de sciences comme DALTON transgresse ces deux interdits.

Se reporter ici à la **diapositive N° 10**

Rejet de l'atomisme et attitude phénoménologique en science 19°s

« la révolution fondamentale qui caractérise la virilité de notre intelligence consiste essentiellement à substituer partout à l'inaccessible détermination des **causes** proprement dites, la simple recherche des lois, c'est-à-dire des relations constantes qui existent entre les phénomènes **observés** » A.COMTE Discours sur l'esprit positif

« Si j'en étais le maître, j'effacerai le mot atome de la science, persuadé **qu'il va plus loin que l'expérience** ; et jamais, en chimie, nous ne devons aller plus loin que l'expérience » J.B.DUMAS (chimiste français)

Pour KIRCHHOFF (physicien allemand) porte-parole de la tendance phénoménologique, la Mécanique doit être « une **pure description** complète et univoque des processus de transformation qui ont lieu dans la nature » Vorlesungen über mathematische Physique ;Mechanik Leipzig 1874 p.1

Il serait tentant ici de distinguer entre une philosophie de la science (le positivisme) considérée comme une idéologie et la science elle-même. Mais depuis quand une pratique institutionnalisée est-elle séparable de normes qui règlent effectivement ses démarches, ses procédures de validation, ainsi que sa manière de transmettre et de faire prospérer un savoir théorique bien typé et particulièrement performant ? Or avec les académies des sciences, les études universitaires, les laboratoires, les instituts de recherche théorique, les colloques et les revues scientifiques la science réelle et vivante comme pratique théorique est devenue une pratique institutionnalisée de ce genre. C'est ainsi en particulier que s'est développée en Europe du 19° siècle une normalisation de l'attitude scientifique appelée dorénavant « phénoménologique » et un physicien allemand KIRCHH0FF a remarquablement résumé le mot d'ordre de cette attitude, qui apparaît comme ayant force de règle pour tous les futurs physiciens.

C'est pour nous l'occasion de se demander où se trouvent les obstacles à la fécondité théorique de la science ; en dehors d'elle-même ou en elle-même ? La réponse convenue n'est peut-être pas indiscutable. Certes au 16° et 17° siècle l'opposition à l'atomisme importé en science est venue de l'extérieur de la science et dans des conditions parfois très dramatiques. Mais n'y-a-t-il pas au sein de la science vivante, interférence de principes fondamentaux considérés comme liés essentiellement à la science, soit sous l'angle de la **forme générale** de la démarche scientifique, soit sous l'angle du **contenu principiel** des théories scientifiques elles-mêmes ? N'est-il pas évident que c'est la domination de l'optique Newtonienne, approche corpusculaire de la lumière, qui entrave le déploiement – tout à fait possible d'un point de vue théorique – de **l'optique ondulatoire** fondée par

Huygens (reprise et modifiée plus tard par Fresnel au début 19° siècle)? Certaines expérimentations faites indépendamment par Hall et surtout Euler (l'un des plus grands savants du 18° siècle) mettaient en défaut la théorie corpusculaire et ont conduit Euler a reprendre et à perfectionner Huygens : les couleurs sont dues à des ondulations de longueur d'ondes différentes, a-t-il eu l'audace de soutenir sans être entendu par personne. **Un siècle entier de graves négligences liées à la domination d'un paradigme** ! C'est dans une impasse de même durée mais portant sur la forme de la science en général que se trouvent les défenseurs de l'atome aux 19° siècle, pas simplement de nombreux chimistes (nous venons de le voir), mais aussi des physiciens, comme Maxwell et Boltzmann (cf. I C f). **Un siècle de prohibition liée à une définition de la science par les scientifiques eux-mêmes.** En termes d'honnêteté intellectuelle et de stimulation pédagogique, il me semble dommageable de passer sous silence cette opposition scientifique à l'idée d'atome…Après tout, ce qui peut faire tout l'intérêt de la recherche scientifique, c'est qu'elle reste - pour les tournants fondamentaux - une aventure passionnante impliquant des risques , des conflits, des initiatives audacieuses, des hésitations douloureuses, des combats de longue haleine, des résistances farouches et des percées formidables… il n'y a pas que l'indispensable développement patient, méthodique et organisée de la **science normale** ; il y a aussi des moments de science plus ou moins **révolutionnaires** où certains savants se heurtent à des résistances considérables dans la communauté scientifique elle-même et pour des raisons de mobilisation du savoir scientifique tel qu'il existe effectivement! Est-il possible d'isoler un discours scientifique pure du complexe des multiples pratiques discursives effectives des savants ? Je ne suis pas sûr que la réponse positive soit indiscutable.

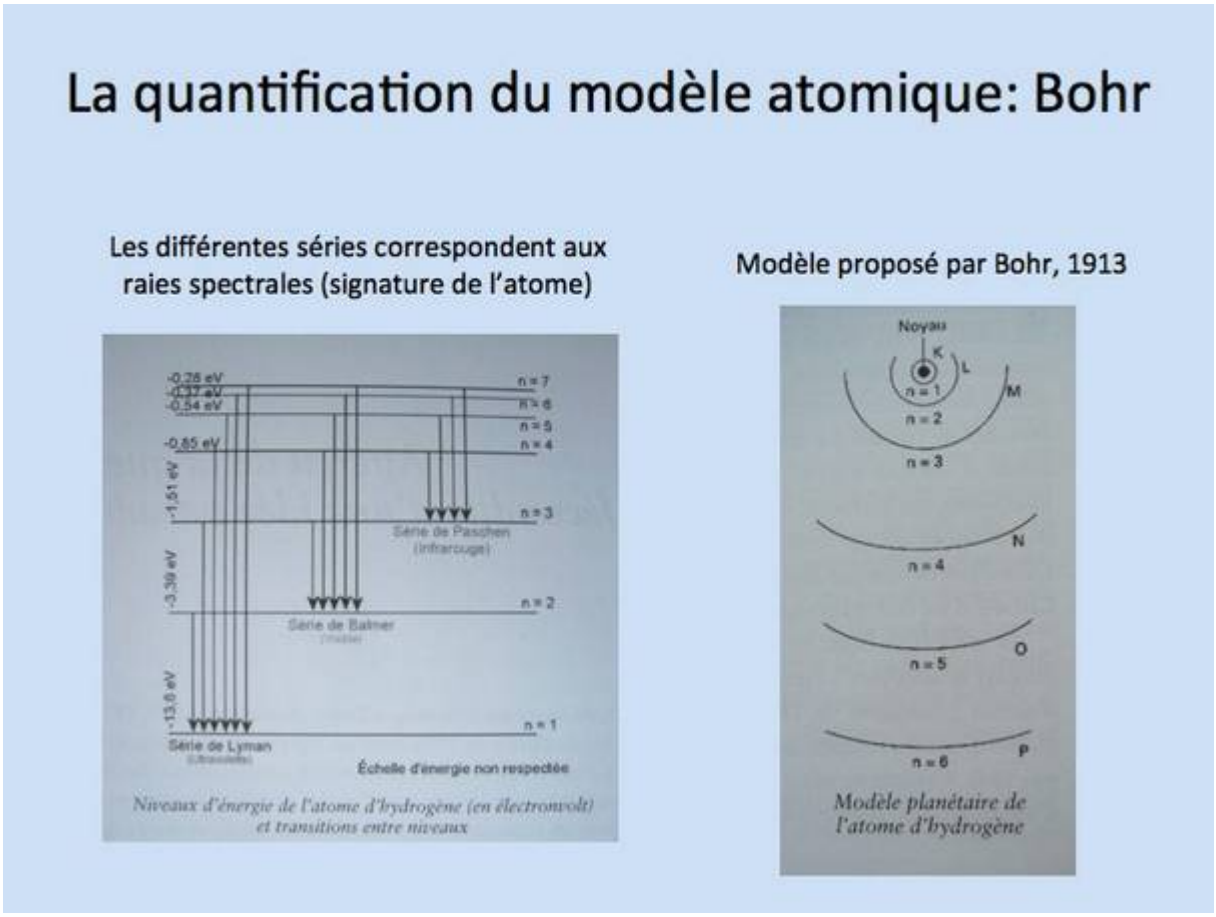
A la vérité**, ceux qui défendront puis établiront au début 20°siècle l'existence de l'atome partent du principe que la science a un pouvoir explicatif et pas seulement une capacité descriptive**. Pour l'atome, c'est indiscutable chez Boltzmann, chez Einstein et chez Bohr… et l'on retrouve aussi cette attitude chez Perrin . On peut même penser ici que c'est la forme de réflexion scientifique que va de plus en plus nettement promouvoir Einstein tout autour de lui. Voilà ce qu'écrit pour sa part **Perrin** :

« Deviner ainsi l'existence et les propriétés d'objets qui sont encore au-delà de notre connaissance, ***expliquer*** *du visible compliqué par de* ***l'invisible*** *simple*, voilà la forme d'intelligence **intuitive**, à laquelle grâce à des hommes comme Dalton ou Boltzmann, nous devons l'atomistique » les atomes p.24 (le passage en italique vient de l'auteur ; les caractères gras viennent de moi)

Perrin fait ici valoir pour la recherche en science « une méthode intuitive », bien différente de « la méthode inductive », mais aussi légitime qu'elle et particulièrement mobilisée à certains moments du développement de la science. Il ne fait aucun doute qu'Einstein et Bohr ont utilisé très largement cette seconde méthode pour leurs contributions décisives aux deux grandes révolutions théoriques dans la physique du début 20° siècle (théorie de la relativité et physique quantique).

Mais revenons plus particulièrement à l'atome. N'oublions pas - pour n'y point revenir - que la première théorie quantique de **l'atome proposée par Bohr en 1913,** qui quantifie des niveaux de circulation électronique autour du noyau de l'atome (quantifier revient à introduire une discontinuité irréductible dans les phénomènes physiques par le biais de quantités incompressibles en rapport avec la constante de Planck), **explique** non seulement les raies spectrales émises par tout atome excité, mais surtout jette les bases d'une **explication** physique du système périodique des

éléments (le tableau de Mendeleïev) **. Diapositive N°11 je n'insiste pas sur ce point.**



Bien entendu il convient ici de distinguer **l'explication dans les sciences** qui réfère un niveau de phénoménalité à un niveau plus fondamental de phénoménalité… et **l'explication intégrale de nature métaphysique** qui rend compte de façon ultime d'un phénomène en le référant à l'ordre global de toutes choses. On a compris que ce type scientifique d'explication est vérifiable expérimentalement….mais c'est néanmoins une forme de réponse à la question « pourquoi » et les hommes de science en ont parfaitement conscience.

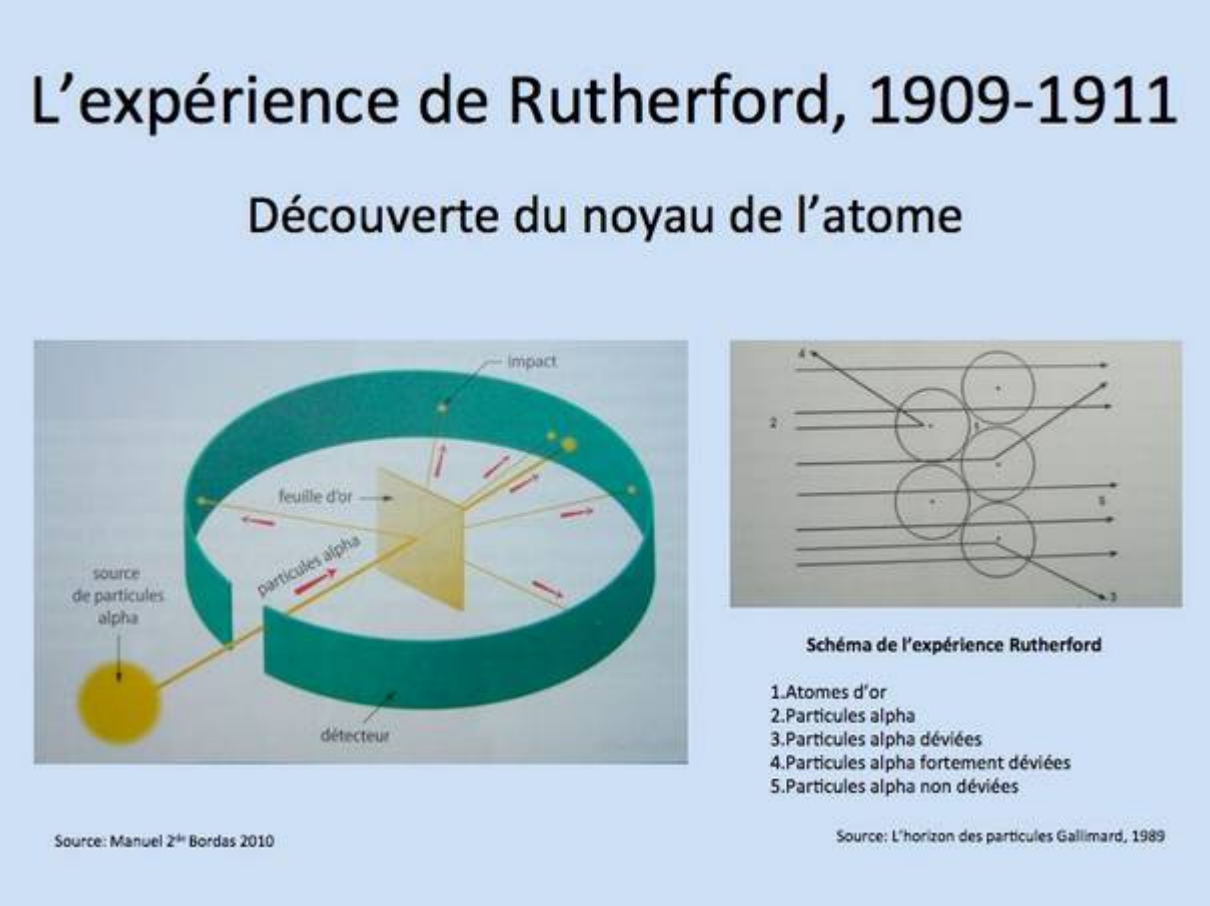
Au terme de cette présentation de l'atome en discussion au 19° siècle, notons **qu' il est possible ici de faire distinguer par les élèves des niveaux différents d'acceptation de l'idée d'atome au sein même des discours scientifiques tenus.** Pour ceux qui à la fin établiront la réalité de l'atome, celui-ci deviendra **une certitude objective** de nature scientifique, bien délimitée par les termes théoriques employés et par un contexte expérimental déterminé. Pour nos défenseurs héroïques de l'atome - style Boltzmann - c'est une **hypothèse très plausible**, c'est-à-dire non seulement cohérente, mais hautement probable. Pour les opposants radicaux, il s'agit d'une **conjecture inadmissible**, c'est-à-dire d'un délire de l'imagination qui n'a pas sa place en science et qui est dangereux pour l'existence même de l'esprit scientifique. Pour un grand nombre de chimistes qui ne veulent pas trancher ce débat mais qui sont attachés aux avantages de l'idée d'atome, il s'agit **d'une symbolisation efficace (un point c'est tout)…….** ou pour certains physiciens, attentifs à toutes les objections possibles et à l'efficacité de l'idée, il s'agit d'une hypothèse discutable en elle-même mais particulièrement

suggestive ou plus exactement d'un **artifice théorique heuristiquement fécond.**

2. L'expérience de RUTHERFORD : fécondité de la recherche expérimentale et remaniement des modèles de l'atome.

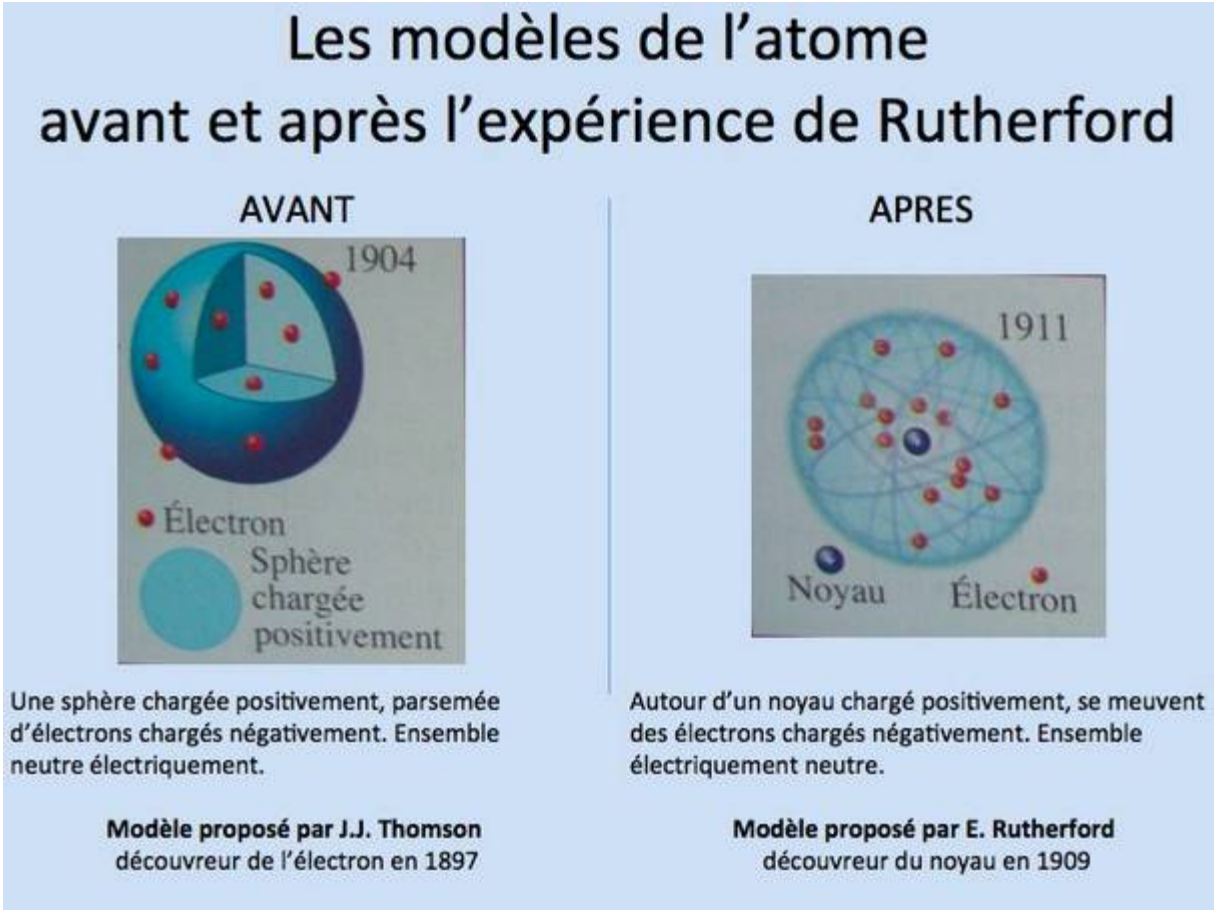
La composante résolument expérimentale de la recherche scientifique ne doit pas être pour autant dévalorisée. Elle joue souvent un rôle essentiel (indépendamment même de sa fonction incontournable de validation après coup) et nous allons le voir avec RUTHERFORD.

Diapositive N° 12



À l'occasion de cette expérimentation, **Rutherford** va découvrir l'existence du noyau –réalité très concentrée - de l'atome. En fait, la réalité de l'atome était à l'époque acquise depuis les premières expérimentations de Perrin, dès 1908 sur certains mouvements moléculaires remarquablement bien étudiés (voir I B f). L'on pensait par ailleurs avec Thomson et Lorentz que l'électron (particule dont l'existence avait été prouvée expérimentalement par le même Perrin en 1895 puis surtout par Thomson en 1897, etc…) rentrait dans la composition de la matière et donc dans la constitution de l'atome ; on a même durablement pensé que l'électron était le principal composant de la matière. L'idée de Rutherford – précurseur génial des pratiques contemporaines de collision entre particules – était d'envoyer un faisceau de particules alpha (nous reviendrons sur ces particules ultérieurement) sur une feuille d'or **très peu épaisse** pour en savoir plus sur la structure de la matière et donc sur la nature de l'atome. **L'enjeu n'était donc pas l'existence de l'atome mais son identité structurelle .**

La très lourde masse de la particule alpha (73000 fois la masse de chaque électron) et donc son énergie cinétique (correspondant à sa masse et à sa vitesse de propagation) donne à cette particule un pouvoir percussion extraordinaire et l'on avait déjà remarqué que son pouvoir de pénétration était grand. Mais il y a dans l'atome d'or pas seulement des électrons à la masse très faible, mais comme cela est très hautement probable, une entité électrique positive venant équilibrer l'électron chargé négativement pour assurer la neutralité électrique constatée de la matière ordinaire. Que va-t-il se passer quand la particule alpha va rencontrer cet autre entité ? Dans le modèle de l'atome proposé par J.J. Thomson —le « plum-pudding » (voir une première fois **la diapositive 13** à gauche)— l'entité positive a la forme d'une sphère qui en raison de son extension serait moins dense que la particule alpha et qui serait assez facilement pénétrable par cette particule alpha.



En effet pour assurer l'unité de l'atome cette entité positive devait englober en elle tout en les distanciant les uns des autres les électrons (qui autrement au contact les uns des autres seraient animés par de violents mouvements de répulsion , les corps de même charge électrique [ici négative] se repoussant les uns les autres) **. Ces particules alpha auraient dû donc traverser sans difficulté la fine feuille d'or.** Or à la grande surprise de tous, il n'en fut rien. Certes un nombre énorme de particules alpha traversent sans aucune déviation… mais quelques unes sont un peu déviées… et surtout quelques excessivement rares sont comme renvoyées vers la source ou presque.

Il faut ici savoir raconter une expérimentation pour la rendre vivante dans l'esprit des élèves et pour mieux en faire percevoir la logique. Rutherford personnalité expansive a dit à cette occasion ceci : c'est **« presqu'aussi incroyable que si vous aviez tiré un obus de 3OO sur un morceau de papier de soie et qu'il était revenu vous frapper ».**

Quand on présente cette expérimentation, on oublie de mentionner que Rutherford va mettre dix-huit mois - à peu près - pour trouver la solution, ce qui montre bien que l'idée ne provient jamais immédiatement de l'expérimentation elle-même. On peut comprendre en effet la longue perplexité de Rutherford. D'abord il voulait recueillir les informations les plus précises possibles sur le nombre de particules déviées et surtout sur les angles de déviation, ce qui a enclenché un programme soutenu d'expérimentations complémentaires dont il fallait attendre les résultats. Mais surtout une telle disparité dans les trajectoires des particules alpha (les unes allant tout droit , les autres étant comme repoussées) conduisait fort probablement à envisager une rupture de l'unité de l'atome. Or le grand acquis de la chimie et de la cinétique des gaz (et des liquides) était l'existence certaine d'un élément ultime insécable et plein : l'atome… le résultat de l'expérimentation était une sorte de catastrophe théorique.

En fait, le seul moyen de rendre compte d'un rebondissement d'une telle violence était de prendre en considération les forces électromagnétiques incomparablement plus puissantes que celle de la gravitation. Cette mobilisation avait en outre l'avantage de régler d'un seul coup les deux problèmes posés….et de rendre compte de tous les aspects de l'expérimentation. Depuis Coulomb chacun sait qu'il y a répulsion inévitable pour les charges électriques de même nature et attirance irrésistible pour les charges opposées. Si donc la particule alpha que Rutherford savait chargée positivement se heurte à une charge positive extrêmement concentrée, elle est repoussée violemment ; si elle passe un peu à côté elle est déviée par le champ électromagnétique ; si elle passe assez loin elle continue tout droit… **reprendre diapositive 12 partie droite.** En revanche, pour des raisons d'une immense disparité de masse, cette même particule alpha ne subira pas d'attirance de la part des électrons et ne modifiera pas sa propre trajectoire en leur voisinage ou contact. Il faut donc supposer pour l'atome d'or l'existence d'un noyau très concentré incomparablement plus lourd que l'électron (et même en l'occurrence plus lourd que les particules alpha) et chargé positivement ; c'est lui qui va provoquer le rebond quand la particule alpha va droit sur lui en étant repoussé avant même de l'avoir atteint. Et si par ailleurs - indépendamment de ce rayonnement alpha - des électrons de très faible masse mais chargés négativement sont à proximité toute relative d'un noyau de masse très lourde chargé positivement, les électrons en question tournent autour de lui attirés non par la gravitation mais par une force électrostatique extrêmement puissante. En conséquence de quoi, la stabilité au moins relative de l'atome (noyau et électrons autour) est assurée. Mais le problème de la stabilité de l'atome n'était pas la préoccupation fondamentale de Rutherford. Enfin comme le noyau très ramassé est extrêmement petit….il ne faut pas s'étonner que les rebonds complets soient rares… et que l'on ait jamais rencontré expérimentalement le noyau avant.

Là encore, les formules de Rutherford font merveille ; la probabilité d'impact entre la particule alpha et le noyau d'atome d'or est très réduite : **« c'est comme si on essayait de tirer sur un moucheron dans l'Albert Hall [très grande salle de concert ou de conférence à Londres] en pleine nuit »**

On peut se demander comment Rutherford est parvenu à déployer cette perspective. Il me semble

qu'on peut avancer deux considérations : le type d'angle constaté et étudié expérimentalement pour les trajectoires de rebond correspondait à ce que Rutherford aurait appris - lors de ses études en Nouvelle-Zélande - sur la forme hyperbolique d'un mouvement de répulsion résultant de la loi de Coulomb. Mais il se trouve aussi que Rutherford était probablement prédisposé plus qu'un autre à modifier l'idée qu'on se faisait couramment de l'atome, car il s'était fait connaître auparavant par sa découverte de la transmutation des éléments chimiques et donc des atomes. Et il avait donc déjà été forcé d'abandonner pour l'atome la caractéristique d'immuabilité et donc aussi le caractère absolument compact pour les cas particuliers des corps radioactifs. Le voici amené à affirmer maintenant que l'atome n'est pas plein, mais composé pour l'essentiel… de vide : l'espace entre le noyau et les électrons.

La question que l'on rencontre ici est celle de l'impact de l'expérimentation sur l'élaboration d'une théorie novatrice. En l'espèce, cet impact semble décisif et clairement orienté ; on part de l'expérimentation et il en résulte une théorie. Au demeurant d'ailleurs Rutherford n'aimait pas en physique les théoriciens purs. Pour autant, on peut facilement montrer ici que la démarche proprement expérimentale enveloppe toujours une dimension théorique. Le constat de grave anomalie ou de surprise totale ne peut être prononcé que par quelqu'un qui dispose de connaissances physiques solides… de même pour l'élaboration de la solution proposée. Nous venons de le voir. Le constat pur (sans regard théorique) ne dit rien et ne mène à rien…..et l'on peut même penser qu'il n'existe jamais si l'on assimile les considérations préscientifiques à une forme rudimentaire de structuration théorique. Cela dit**, l'impulsion principale pour l'innovation théorique résiderait dans l'expérimentation négative ou plus exactement polémiqu**e. Nous verrons plus loin que ce n'est pas toujours le cas.

Quoi qu'il en soit, il semble clair ici que c'est un ancien modèle de l'atome – celui de Thomson – qui est disqualifié et que c'est un autre modèle - celui de Rutherford - qui est proposé. Attardons nous sur ce point.

Reprendre la diapositive N°13

On voit bien ici qu'avec le premier modèle - celui de Thomson - la particule alpha ne peut rencontrer aucune réaction électrostatique car au sein de l'atome le positif et le négatif se neutralisent par la présence constante des électrons négativement chargés dans l'atome global chargé positivement ; c'est donc une réalité complètement neutre électriquement que devait traverser sans difficulté les particules alpha positives. Au demeurant – nous l'avons déjà noté - le modèle du « plum-pudding » en séparant les électrons les uns des autres évite qu'ils se repoussent mutuellement, ce qui aurait compromis l'existence même de l'atome.

Le second modèle a déjà été commenté précédemment.

Mais qu'est-ce qu' « un modèle » en sciences physiques exactement ? On voit bien ici que le modèle est une construction intellectuelle ad hoc qui correspond à une schématisation théorique simplifiée ; une sorte de maquette théorique pour un ensemble de phénomènes. C'est donc une construction adaptée à ce que l'on sait théoriquement et surtout à ce que l'on constate expérimentalement. En réalité, Il se présente le plus souvent comme un simple instrument

d'intelligibilité le plus souvent sans prétention ontologique. Rutherford confiera à l'un de ses assistants : « maintenant je sais à quoi **ressemble** l'atome **». A la question de savoir si le modèle est une fiction artificielle commode ou une anticipation remarquable de la réalité,** il semblerait ici qu'il faudrait retenir la première réponse sans pour autant lui dénier tout pouvoir d'anticipation. Car enfin même si le modèle est finalement récusé, il contient souvent des éléments qui vont être maintenus et surtout paradoxalement par ces aspects invalidés, il ouvre par contrecoup des possibilités d'innovation théorique pertinente. Toute négation est ici une négation **déterminée**, qui ouvre, appelle et délimite aussitôt la **détermination** d'une affirmation autre. Plus grossièrement, on pourrait presque dire qu'avec les modèles les chercheurs prêchent le faux pour savoir le vrai, le rôle de l'interlocuteur étant tenu ici par l'expérimentation.

On pourrait faire repérer par les élèves les éléments maintenus quand on prend en considération les différents modèles de Rutherford, Bohr, De Broglie et disons actuels……cela montrerait qu'il y a tout de même avec Rutherford un acquis définitif.

Au demeurant, Rutherford lui-même connaissait les insuffisances du modèle qu'il proposait. Dans l'idée que Rutherford se faisait de son propre modèle , quand une particule chargée électriquement se déplace en subissant une accélération (ce qui est le cas de tout objet se mouvant en cercle autour d'un autre objet central) elle perd nécessairement de l'énergie en émettant un rayonnement électromagnétique …en conséquence selon les connaissances scientifiques en vigueur à l'époque, l'électron perdant son énergie, devrait s'écraser sur le noyau en un millième de milliardième de seconde après une très courte trajectoire en spirale… Si Rutherford propose néanmoins son modèle, c'est qu'il estime qu'il donne satisfaction par ailleurs sur des points essentiels… et qu'on trouvera bien une réponse au problème posée par la déperdition attendue d'énergie grâce à une meilleure connaissance ultérieure. Il écrira : « il n'est pas besoin d'envisager à ce stade la question de la stabilité de l'atome, elle dépendra manifestement de la structure fine de l'atome.. ».Cela dit **Rutherford est un exemple très heureux du savant qui refuse de s'enfermer dans un réseau de principes a priori et dans une logique conceptuelle générale bien établie** : si c'est ainsi et que cela nous déroute intellectuellement, c'est tout de même ainsi et c'est à nos cadres de pensée de s'adapter au réel et non l'inverse. Pour Rutherford, la réflexion philosophique en général et métaphysique en particulier, ce sont des spéculations sans grand intérêt. Avis fréquent mais non partagé par tous les savants, nous le verrons et nous verrons pourquoi.

Le propre d'un modèle en sciences physiques serait donc d'être nécessairement provisoire et de ne pas prétendre au statut de vérité scientifique. Tôt ou tard il sera remanié et abandonné, mais il a toujours la caractéristique obligatoire de pouvoir être testé expérimentalement et le grand avantage d'orienter des programmes de recherche… pour un temps.

Nous venons de parler ici du modèle au sens restreint, alors qu'il y a de nos jours un usage plus large. Pour ceux qui défendent la conception sémantique de la science, par exemple P. SUPPES, la théorie fondamentale elle-même n'est jamais qu'un modèle caractérisé par un très haut degré d'abstraction. Mais d'une façon plus courante, on fait souvent de la forme d'une théorie dominante pas seulement —même si c'est le sens primordial— ce sur quoi une nette majorité de savants s'accordent actuellement mais aussi peut-être implicitement dans ses grandes lignes tout au moins un modèle pour toutes les autres théories à venir. C'est ainsi qu'on peut interpréter l'usage fréquent en

physique contemporaine du terme de « modèle standard ». En fait ici le modèle peut se rapprocher partiellement de ce que KUHN appelle un paradigme, c'est-à-dire une sorte de théorie archétype pour toute une époque de la pensée scientifique. **Une telle extension peut conduire à l'idée que toute élaboration intellectuelle de nature scientifique —lois, principes, tableaux synthétiques, théories— serait sous la pression d'expérimentations nouvelles susceptible de révision radicale et ne constituerait que des constructions symboliques destinées seulement à « sauver les phénomènes » sans pouvoir prétendre un seul instant nous révéler fût-ce partiellement la réalité des choses elles-mêmes.** Nous verrons un peu plus loin qu'on est en droit de discuter cette idée. Le débat qui se profile ici est le suivant : **le discours scientifique est-il expression précise et légitime de la réalité elle-même (option réaliste) ou simple invention artificielle permettant de faire des prédictions exactes (option antiréaliste) ?**

3. Le tableau de Mendeleïev : de l'influence positive d'une conception a priori dans une découverte à prétention réaliste

Chacun connaît le tableau de Mendeleïev qui figure dans tous les manuels de sciences physiques. Dans sa version actuelle, tous les éléments chimiques sont classés 1) en fonction d'un numéro atomique ayant une signification chimique spécifique; le tableau rassemble en une même colonne verticale une même famille d'éléments ayant des caractéristiques chimiques identiques puisqu'ils sont caractérisés par le même nombre d'électrons présents sur la couche périphérique des électrons autour du noyau (retour périodique de certaines caractéristiques). 2) en fonction de leur masse croissante (liée à une augmentation par unité de leur numéro atomique) ; cette hiérarchisation se déploie aussi selon une colonne horizontale (revenant de temps en temps au point de départ pour repartir la ligne en dessous toujours de gauche à droite). Dans le cours de seconde, le numéro atomique été défini ; il renvoie au nombre de protons (positifs) d'un atome et pour des raisons de neutralité électrique de l'atome ce nombre correspond simultanément au nombre d'électrons (négatifs).

Ce qu'il y a de prodigieux dans la découverte de Mendeleïev, c'est qu'il va trouver cet ordre de classification dans son principe, sans connaître le numéro atomique et en ignorant tout de la structure interne de l'atome ! Comment cela a-t-il été possible ? Voilà ce qui me semble particulièrement opportun de montrer si l'on veut comprendre la recherche scientifique sous tous ses aspects. Indiquons donc comment ici un chimiste a construit – pour partie - notre connaissance de l'atome et comment les chimistes en général ont identifié la nature de cette découverte.

Au milieu du 19° siècle ; Mendeleïev se trouve dans une situation que beaucoup de chimistes de l'époque ont rencontrée. Il y a maintenant trop d'éléments chimiques distincts à manipuler : plus de cinquante. Il faut donc construire une classification et beaucoup de chimistes ont essayé de le faire ; certains même, tout comme Mendeleïev, ont supputé à cette occasion que certains éléments n'étaient pas encore connus**. Quelle est donc l'originalité extraordinaire de notre chimiste russe ?**

Elle se trouve principalement dans le fait qu'il va déterminer deux critères de classification ce qui va lui permettre de déterminer beaucoup mieux chaque élément au croisement si l'on peut dire de ces deux critères. **Mais surtout il va nettement se singulariser par le choix de son second critère**. Nous

suivons en grande partie ici les analyses de Mme B. BENSAUDE-VINCENT.

Diapositive N°14

<u>Tout le monde tenait compte de la masse. Mendeleïev adopte lui-aussi ce critère pour la colonne horizontale en ordre croissant de gauche à droite,</u> même si l'on revient à la ligne de temps en temps (c'est encore la périodicité déjà évoquée**<u>). Mais il choisit comme second critère d'établir entre les colonnes verticales des différences très nettes. Il a sur ce point une position de principe, qu'il faut bien penser comme a priori, comme quoi il y a au départ une pluralité irréductible des éléments premiers et qu'on peut seulement regrouper en des colonnes verticales bien distinctes tous les éléments ayant des propriétés chimiques identiques.</u>** <u>Notre savant rejette donc totalement l'hypothèse communément partagée par les chimistes de l'époque selon laquelle il y aurait un engendrement progressif de tous les éléments chimiques à partir d'**un premier élément** (on prenait généralement l'Hydrogène ; cette hypothèse formulée par Prout était **très à la mode courant 19° siècle**).</u>

Ces deux critères renvoyaient à des connaissances expérimentales bien connues. On avait établi la masse pour chaque élément ; on retrouve donc sur la première grande ligne horizontale un ordre croissant 7 ; 9,4 ; 11 ; 12 ; 14 ; 16 puis sur la seconde23 ; 24 ; 27,3 ; 28 ; 31. Pour la première colonne verticale, on retrouve les métaux alcalins caractérisés tous par les propriétés suivantes : solide mou, gris, s'oxydant rapidement au contact de l'air, très réactif avec l'eau ; les oxydes obtenues donnent

les bases. On retrouve dans cette catégorie Li lithium ; Na sodium ; K potassium ; Rb rubidium ; Cs césium……on laisse de côté les éléments entre parenthèse qui en fait, nous le savons nous, ne rentrent pas dans cette catégorie… (Probable que Mendeleïev lui-même devait considérer leur positionnement comme problématique…).

Je souligne - pour ma part - que sur le point de la pluralité irréductible des éléments premiers, il rejoint le point de vue originaire de Dalton et au-delà de lui - probablement sans le savoir - l'une des idées de l'atomisme antique, comme quoi il y a pour les atomes originairement une pluralité de formes ou configurations bien différentes ayant chacune des effets spécifiques en matière de combinaison et donc en matière de caractérisation des produits engendrés par ces combinaisons. Un modèle explicatif général a ses contraintes internes. Cependant pour l'atomistique chimique, le nombre des éléments premiers est limité (en rapport avec le souci de pouvoir les identifier tous expérimentalement) et la réduction à une seule caractéristique, la masse, a été mise en œuvre, alors que chez Epicure et Lucrèce, il y a un nombre très grand de formes et surtout plusieurs caractéristiques distinctives, sans pouvoir jamais un jour chiffrer ces caractéristiques. Aussi bien il convient de s'en tenir ici à la référence à Dalton… mais celui-ci a bel et bien une conception principielle de l'atome, fût-elle minimaliste.

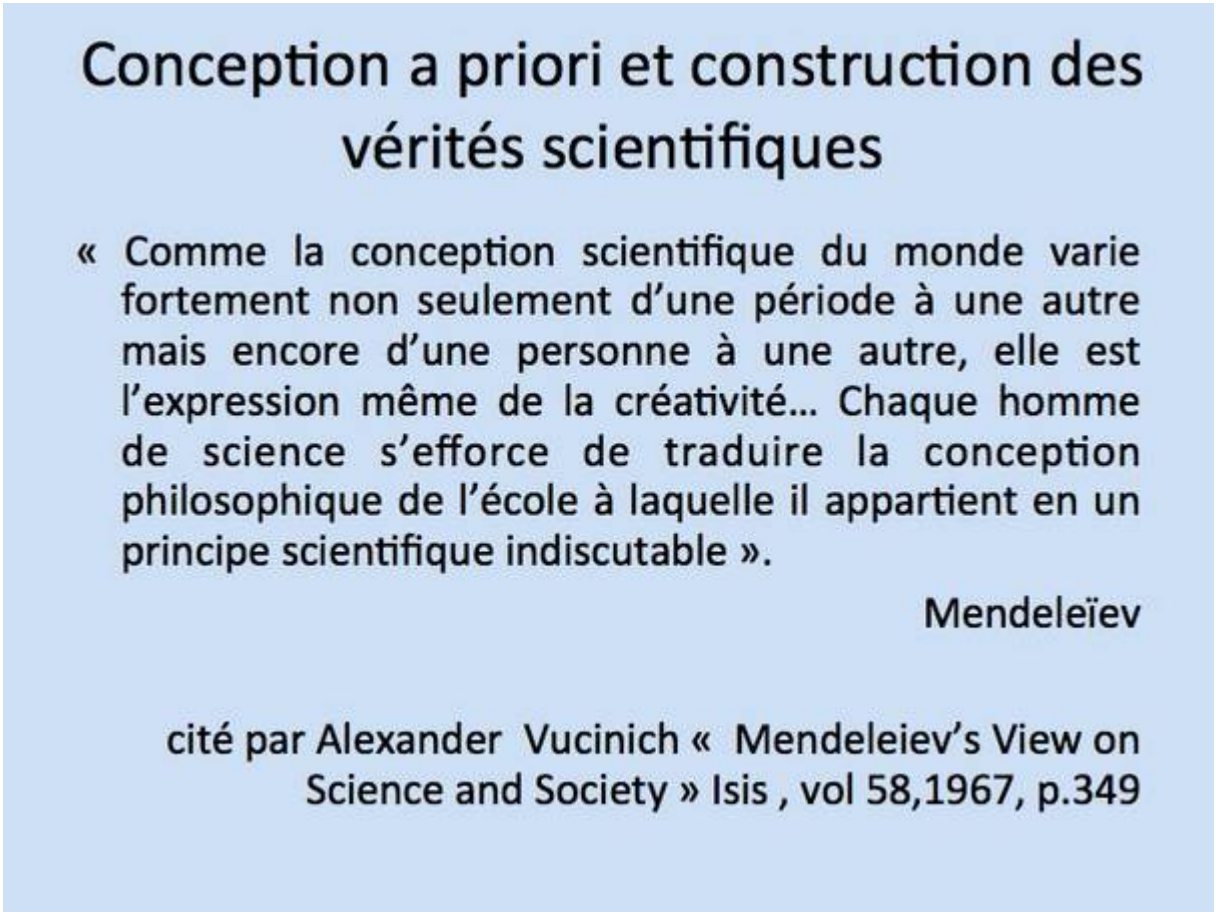
Au terme de son travail de classification, en raison du double cadrage et surtout de sa pertinence, Mendeleïev disposait d'informations beaucoup plus précises que ses concurrents et il a découvert en outre que certaines caractéristiques se combinaient entre elles ; il parvient à « une systématique des éléments ; l'expression est de lui. **Il a pu dès lors faire des prédictions étonnantes**. Ne pas simplement dire que dans une case vide, il devait y avoir un type d'élément autre à découvrir, mais indiquer à l'avance les caractéristiques précises de ce nouvel élément. Le manuel de notre chimiste a été publié pour la première fois en 1869. Quelques années plus tard on découvrira l'éka-aluminium, l'éka–bore et l'éka-sicilium avec des caractéristiques strictement conformes aux prévisions. Mieux encore, **Mendeleïev est tellement sûr de la cohérence de son tableau, qu'il se permet de rectifier la masse atomique établie par des expérimentations antérieures et reçu par la communauté scientifique.** Ainsi il estimera qu'il faut corriger la masse atomique du tellure ou celui de l'uranium…pour ce dernier il proposera même de le doubler en passant de 120 à 240… Les faits ultérieurs lui donneront raison.

On peut comprendre qu'avec de telles confirmations expérimentales, Mendeleïev et ceux qui adoptèrent son tableau conçurent le discours scientifique comme **capable d'exprimer le réel lui-même ou plus exactement son architecture structurelle.** Mais un sentiment subjectif fût-il partagé n'est pas assimilable à une preuve objective. Celle-ci se trouverait plutôt **dans l'étonnante permanence du tableau à quelques détails mineurs près**, une fois découverte la structure de l'atome et acquis les développements de la physique quantique… bien plus tard. Mais il me semble difficile ici d'analyser plus avant le problème du réalisme de la science, qui ne peut être plus sérieusement posé qu'en des termes plus compliqués.

Certes l'œuvre de Mendeleïev n'aurait pas été possible, si notre savant n'avait pas eu assez tôt – en amont - la conviction qu'il y avait une correspondance réglée entre la masse spécifique des atomes et leurs propriétés chimiques et que donc l'on devait pouvoir formuler une loi exprimant précisément cette correspondance ; et il a eu le pressentiment d'une périodicité possible à partir d'un ensemble

troublant de résultats empiriques convergents, surtout après les travaux expérimentaux de Berzelius. En hiérarchisant les masses, en les faisant défiler par ordre croissant, on devrait pouvoir retrouver périodiquement les mêmes propriétés. Certes précisément l'œuvre de Mendeleïev n'aurait pas été possible sans une masse considérable d'informations dont il tire parti et notre chimiste le reconnaît explicitement : le siècle avait été riche en constats empiriques très instructifs. **Mais quand on opère la synthèse d'informations très diverses, tout dépend de la forme de cette synthèse et celle-ci dépend des initiatives intellectuelles de celui qui opère la synthèse et non des éléments synthétisés eux-mêmes.** Voilà pourquoi Mendeleïev travaille aussi dans la construction de sa synthèse comme un théoricien… et comme tout théoricien il surplombe l'expérience, pour réviser ou anticiper certaines « données » expérimentales, au point qu'ici le travail théorique finit par reposer sur lui-même (sur sa propre cohérence) jusqu'à précéder totalement l'expérimentation et à prévaloir sur elle. **Renversement de la perspective, proposée dans le point 2 consacré à l'expérimentation chez Rutherford….ce qui ne veut pas dire que cette première perspective n'a plus aucune valeur de vérité.** Les choses sont bien plus complexes qu'on le croit spontanément, voilà tout ; et cela appelle précisément la réflexion philosophique…

Pour confirmer mon propos et promouvoir pour un temps cette nouvelle perspective, je fais valoir pour ma part cette citation de Mendeleïev dans **la diapositive N° 15.**



IL faut ici être prudent dans la lecture de ce passage…tronqué et trop court. La conception philosophique (appelée ici « conception scientifique du monde » selon une expression courante à

l'époque) [conception implicitement discutable] qui précède le principe scientifique [principe lui indiscutable] ne doit pas être assimilée à ce que nous appelons ordinairement la métaphysique (celle d'Epicure ou celle d'Aristote ou etc....). Mendeleïev n'entend visiblement pas perpétuer la tradition de la *Naturphilosophie*, (Allemagne du début 19° siècle), où la science se déduisait strictement d'une certaine métaphysique totalement spéculative. La citation précise bien dans la première phrase « conception scientifique du monde ». Il faut sans doute comprendre par là un ensemble ordonné de principes fondamentaux concernant l'ordre de la nature, principes qui ,par leur très grande généralité et leur extension à la totalité des réalités visées, se situent - en un sens - à un niveau discursif métaphysique mais qui s'articulent au savoir scientifique de l'époque et peut-être même à tel ou tel savoir scientifique spécialisé. Il me semble que « l'école » dont il est question à la fin renvoie aux courants de pensée qui s'opposent dans le champ restreint d'un domaine de savoir. Au 19° siècle en chimie les pro atomistes s'opposent aux anti atomistes (les équivalentistes). il y a là des questions de principe qui sont tranchées d'une manière ou d'une autre. On sait que Mendeleïev au « Congrès » de Karlsruhe (1860) s'était rangé aux idées du français GERHARDT qui a largement assuré par son influence dans l'Europe entière (mais pas en France…) le triomphe de l'atomisme comme **symbolisation indiscutablement efficace** mais avec beaucoup de réserve dans l'engagement ontologique. Mais il s'était surtout rangé aux positions de l'italien CANNIZZARO qui avait fait adopter par le « Congrès » l**a validité d'une distinction capitale entre molécule et atome.....sous-tendue chez lui personnellement par un engagement ontologique résolu en faveur de l'atome.** Le « Congrès » n'a pas suivi CANNIZZARO sur ses positions personnelles (il fallait ménager tous les membres de l'auguste assemblée), mais **Mendeleïev lui est revenu enthousiaste, convaincu de la réalité de l'atome**. **C'est à partir de là qu'il choisit son second critère de classement, comme quoi les atomes sont irréductiblement différents les uns des autres et qu'il faut surtout veiller à séparer en grandes colonnes verticales bien distinctes les familles ayant des caractéristiques chimiques identiques mais spécifiques.**

Cependant Mendeleïev peut - aussi - avoir choisi son point de départ (pluralité des éléments premiers irréductiblement différents et non dérivation de tous à partir d'un élément absolument premier) dans le rejet de toute question concernant « l'origine ». Cette attitude comme celle qui consiste à ordonner le maximum de faits expérimentaux et à trouver une loi générale, peut montrer que Mendeleïev a probablement été influencé aussi par la tradition positiviste. Mais sans doute s'agissait-il d'un positivisme qui n'exclut plus comme nocif une réflexion préalable sur des principes fondamentaux à l'œuvre aussi dans une science (on retrouve une attitude comparable chez Claude Bernard… mais celui-ci soutient l'idée qu'il ne faut pas pour autant s'enfermer dans un système), réflexion menée par les hommes de science eux-mêmes. Et dans ce cadre-là, il ne reprenait pas à son compte la condamnation absolue de la notion d'atome….au contraire.

Il est donc possible – et parfois très heureux - que des conceptions a priori jouent un rôle dans l'élaboration des théories physiques. Et il arriverait aussi fréquemment que l'homme de science quand il élabore des théories, des tableaux ou des lois fasse preuve d'un engagement résolu qui à notre grand étonnement ne comporte aucun réflexe de prudence théorique. Le critère de vérité pour un théoricien pur se trouve - au-delà des grands principes arrêtés - dans la forme exceptionnelle de sa théorie. **Si la construction théorique est caractérisée par une cohérence parfaite, par un aspect systématique remarquable et par une capacité hors normes à intégrer un maximum de faits à**

partir d'un minimum de principes alors elle ne peut pour lui qu'être vraie. Ce qui ne veut pas dire que l'expérimentation est exclue ; elle est toujours attendue par un homme de science faute de quoi il cesserait d'être tel. Cela veut dire simplement qu'on ne doute plus que - tôt ou tard - la vérification expérimentale adviendra…

En 1914 (bien avant la vérification expérimentale qui sera effectuée par Eddington en 1919) Einstein écrira à son ami Besso au sujet de sa théorie de la relativité générale : « maintenant, je suis entièrement satisfait et **je ne doute plus de la validité de tout le système**, que l'observation de l'éclipse solaire réussisse ou non. La logique des choses est par trop évidente ». A sa manière, Mendeleïev a été lui aussi absolument convaincu par sa « systématique des éléments » et sa remarquable puissance d'intégration.

Dans cette perspective, le savant créateur d'une théorie puissante ou d'un tableau saisissant ne réagit pas comme dans le cas général de l'invention d'un modèle ; **dans son esprit ce n'est plus du « simplement probable à tester », c'est de « l'absolument certain à confirmer** ». C'est une attitude que G.HOLTON a très bien caractérisée. Et précisément**,** selon une autre formule judicieuse de Bachelard, en microphysique contemporaine tout particulièrement, « la démonstration prime la constatation ». On peut souligner en effet par exemple que de nombreuses particules élémentaires ont d'abord été prédites de façon purement théorique ; la confirmation expérimentale venant bien plus tard, parfois plusieurs années après. Ainsi en est-il pour le photon avec Einstein, pour le neutrino avec Pauli ou encore pour l'antimatière mais plus précisément le positron (électron chargé positivement) avec Dirac.

Au demeurant, l'idée que toutes les théories scientifiques en physique passeraient, tout comme les modèles, est très contestable, car c'est oublier que les grandes lois et les grandes théories ont la particularité de ne jamais passer….La mécanique newtonienne dans ces lois essentielles vaut toujours, c'est simplement un cas particulier de la mécanique einsteinienne quand on est en présence de vitesses de déplacement très faibles au regard de la vitesse de la lumière. Et pour rester dans notre sujet il reste vrai que dans un contexte ordinaire, les électrons chargés négativement s'agitent en étant statistiquement présents à différents niveaux de circulation —niveaux définis quantiquement— autour du noyau chargé positivement… quand bien même le modèle de Rutherford n'est plus valable….et quand bien même peut-être il ne pourrait plus y avoir de modèle du tout pour le représenter commodément. Le modèle de Rutherford est passé, mais certaines réalités structurelles sont maintenues.

Il convient donc d'interroger l'image naïve comme quoi le savant se contente d'observer puis alors seulement se met à penser, et comme quoi toute affirmation théorique en science serait vouée tôt ou tard à disparaître. Quel est donc le rapport entre expérimentation et théorie ?Quel est le rapport entre théorie et principes philosophiques ? Quel est aussi le statut exact d'une théorie scientifique dans son rapport à la réalité ?

III UNE CRISE RADICALE D'IDENTITE : LA DESINTEGRATION PROGRESSIVE D'UNE IDEE ET SON MAINTIEN PARADOXAL.

La légitimité d'une émergence, l'effacement d'une identité, la disparition d'une logique, l'objet de la physique des particules élémentaires.

1. les raisons de la mobilisation de l'atomisme en science : des points de convergence étonnants entre approche métaphysique et approche scientifique.

L'étymologie du mot atome justifie largement l'émergence de ce mot dans le vocabulaire scientifique ; on l'a vu avec l'évocation de Dalton. Mais l'usage de ce mot conduit à nous demander si certaines conceptions générales qui accompagnent cet usage se retrouvent aussi bien dans le discours métaphysique que dans le discours scientifique, en négligeant momentanément et artificiellement la différence de registre théorique entre ces deux discours. **Pointons ici non des identités, mais des parentés : elles sont troublantes et dénotent sans doute une forme de communauté dans la démarche conceptuelle générale.** Nous exploiterons ici le texte de Lucrèce.

a. **la distinction entre état solide et états fluides (incluant l'état liquide et l'état gazeux) est principiellement comparable :**

Lucrèce : « il ne peut y avoir aucun repos pour les corps premiers [les atomes] à travers le vide ; au contraire agités d'un mouvement continuel et divers, ils se heurtent puis rebondissent, les uns à de grandes distances, les autres faiblement, et s'éloignent peu. Tous ceux qui formant les assemblages les plus denses [ce qu'on peut appeler l'état solide] ne s'écartent que de fort peu après leur rencontre, enchevêtrés qu'ils sont grâce aux entrelacs de leurs figures [configurations de type géométrique], ceux-là servent de base au corps dur de la pierre, au fer inflexible, et à tout ce qui est du même genre. Ensuite, les autres corps premiers [atomes] peu nombreux qui errent aussi dans le vide immense mais [qui eux] se repoussent à de grandes distances, ceux-là fournissent l'air peu dense [ce que l'on peut appeler l'état gazeux] et l'éclatante lumière du soleil » DRN L II 95/108

Il suffit de se reporter à la diapositive N° 5 pour voir que notre physique définit de ***façon comparable*** les trois états de la matière. Et plus précisément, voilà comment un physicien A.GUINIER définit l'état solide en caractérisant les cristaux : « dans tous les états de la matière les atomes sont mobiles… ils sont agités et leur agitation est même une mesure de la température »..//.. « dans les cristaux, il y a aussi des mouvements d'agitation thermique, mais cette fois –ci les atomes vibrent autour de leur position d'équilibre, si bien qu'en moyenne ils restent ordonnés, bien qu'ils soient animés de mouvements localisés continuels » (la matière aujourd'hui p.146)

b. Lisons maintenant le texte de Lucrèce présenté dans la **diapositive N°16 ; explication de certains mouvements erratiques visibles par les mouvements des atomes.**

Puissance explicative de l'atomisme antique dans un cadre métaphysique

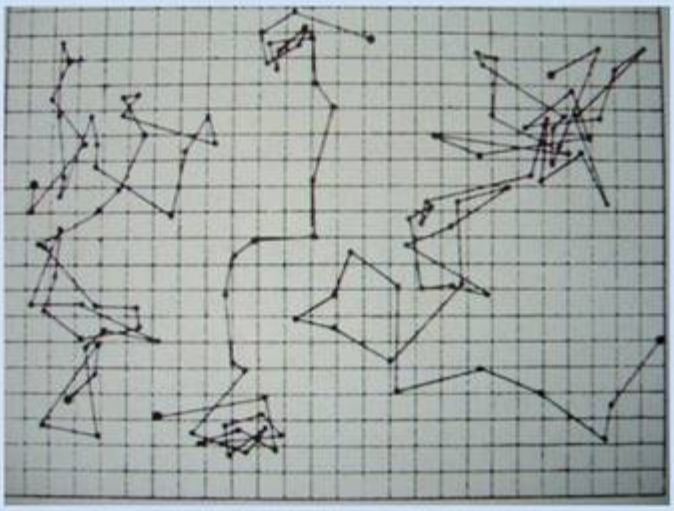
« Une autre raison d'observer attentivement les corpuscules qui s'agitent en désordre dans un rayon de soleil, c'est qu'une telle agitation nous révèle les mouvements invisibles auxquels sont entrainés les éléments de la matière [ultimement les atomes]. Car souvent tu verras beaucoup de ces corpuscules [des poussières] sous l'impulsion sans doute de chocs imperceptibles, changer de direction, rebrousser chemin, tantôt à droite, tantôt à gauche et dans tous les sens. Or leur errance tient évidemment à celle de tous les principes [les atomes] ».

LUCRECE , *De rerum natura*, Livre II 125/132

Nous sommes ici en présence d'une analyse qui ressemble **dans sa signification générale** de façon frappante à l'explication par Einstein du mouvement brownien, mouvement dont nous avons déjà parlé plus haut (cf. I B c et f). **R. Brown** naturaliste anglais du début 19° siècle a observé au microscope en 1827 des grains de pollen dispersés dans une goutte liquide, il constate que ces particules sont animées par des mouvements erratiques incessants….et il ne peut en donner une explication simple et classique. Einstein dans des articles publiés en 1905 et en 1906, propose l'explication suivante : les toutes petites particules en suspension reçoivent de la part des molécules de ce liquide des millions de chocs par seconde (les molécules sont un assemblage déterminé d'atomes ; HOH pour l'eau). Il tire de cette hypothèse des lois quantitatives vérifiables par l'expérience**. Perrin**, nous l'avons déjà dit, confirmera expérimentalement les lois formulées par Einstein et donc son explication, qui correspond, en gros, à une cinétique des molécules du liquide pris en considération.

Voir le schéma de Perrin dans la **diapositive N° 17.**

Schématisation d'un mouvement de type brownien par Perrin(1908-1913)



L'explication du mouvement brownien a été donnée par Einstein en 1905

La schématisation présentée ici correspond en fait à un relevé des positions successivement atteintes toutes les 30 secondes par un même granule en suspension dans une émulsion en traçant des traits entre des positions marquées par des points. Pour des raisons expérimentales Perrin a travaillé en particulier sur des liquides visqueux. Mais il a en fait entrepris un long et très vaste programme de recherche très méticuleux….en variant les matériaux pris en considération (eau, gaz, etc...), les conditions de l'expérimentation…en multipliant les mesures et les comptages par chronophotographie.

Il faut sans doute retenir de ce rapprochement, pas seulement une logique explicative qui est principiellement la même (dans son intention directrice) mais aussi une procédure d'approche identique (dans son esprit). En effet pour atteindre les mouvements de l'invisible (les molécules et donc les atomes), il faut observer les mouvements du microscopique qui est lui visible. En ce qui concerne la logique explicative identique, il ne faut pas nécessairement comprendre ceci comme une influence directe d'une tradition métaphysique sur la science, mais plutôt comme l'existence, en science comme en philosophie, d'un raisonnement général ayant certaines caractéristiques métaphysiques parvenant à partir des mêmes principes aux mêmes conclusions ; on peut alors penser qu'une réflexion de nature philosophique a pu historiquement produire un modèle explicatif du réel de type métaphysique et que ce modèle obéissant à une cohérence spéculative interne peut être retrouvé ou indéfiniment exploité par des non-philosophes (nous en avons déjà parler cf. I C 3).

Notons tout de même au passage un problème possible. En physique, il y a présence pour ces

mouvements moléculaires de lois quantitatives contraignantes de nature mathématique, qui certes ne s'opposent pas nécessairement à la réalité originairement aléatoire des mouvements atomiques (position de Lucrèce et d'Epicure) et à leur complexité ultérieure résultant des très nombreuses collisions, mais qui pourraient fort bien conduire à une opposition radicale **si jamais** ce carcan légal mathématique était défini comme s'imposant aux atomes. Le réel fondamental ne serait plus alors l'atome, mais coïnciderait avec une structure mathématique immuable d'une manière ou d'une autre absolutisée….correspondant en outre à un seul monde possible et à une seule explication possible (thèses inverses de celle soutenues constamment par l'atomisme antique). Nous reviendrons sur ce point in fine.

2. la décomposition progressive de la notion traditionnelle d'atome

Une à une, les caractéristiques essentielles de l'atome sont dans le discours scientifique abandonnées. Les élèves peuvent dans un exercice lister ces caractéristiques et l'on peut faire cette opération bien plus rapidement qu'il n'y paraît avec la longueur apparente du développement qui suit.

a. Dans le cours de seconde, on voit déjà apparaître pourrait-on dire d'emblée **une mise en cause de l'indivisibilité de l'atome**

Avec le modèle de Rutherford, l'on découvre que l'atome comporte des parties bien séparées spatialement, le noyau et les électrons. La preuve complète de cette séparation possible est fournie par l'existence déjà reconnue en chimie des ions (ions négatifs ou anions : un atome déterminé récupère un ou des électrons en plus sur sa couche périphérique …… ions positifs ou cations : un atome perd un ou plusieurs électrons toujours sur sa couche périphérique ; dans les deux cas l'atome perd sa neutralité électrique).Dans le second cas la séparation est réalisée de façon patente.

Avec l'expérience de Rutherford complètement exploitée, on peut même envisager un noyau ayant perdu tous ses électrons, car le rayon alpha utilisé sera finalement identifié à un faisceau de noyaux d'hélium (Rutherford savait même depuis 1908 que c'était de l'hélium ayant perdu deux électrons mais il ne pouvait pas encore parler de noyau ; il parlait plutôt d'hélium ionisé)

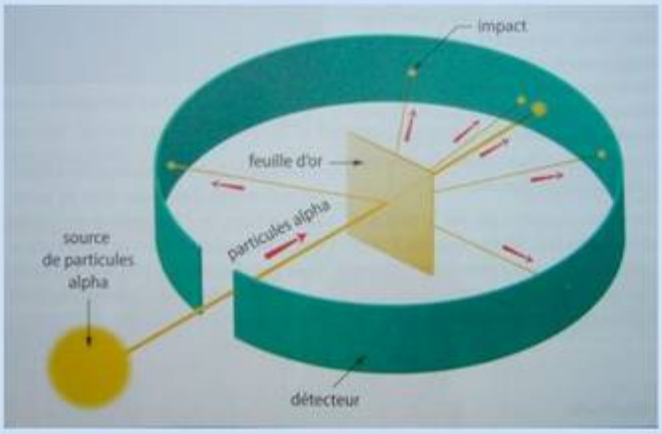
La crise reste ici limitée puisque l'on peut penser que l'élémentaire absolu se retrouve au niveau de ces constituants : noyau et électron. On l'a cru….. et cela reste encore actuellement vrai pour l'électron. Mais ce n'est plus vrai pour le noyau composé de nucléons : protons et neutrons…..

b. Mais le rayon alpha mis en œuvre dans l'expérience de Rutherford renvoie à des découvertes antérieures de ce même grand expérimentateur et celles-ci nous engagent dans une direction bien plus troublante **: la remise en cause de l'immuabilité**

Reprenons la diapositive N° 18 présentant l'expérimentation de Rutherford.

L'expérience de Rutherford, 1909 - 1911

Découverte du noyau de l'atome



Source: Manuel 2de Bordas 2010

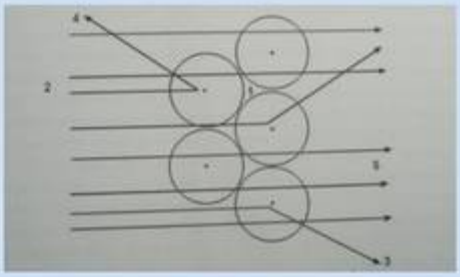


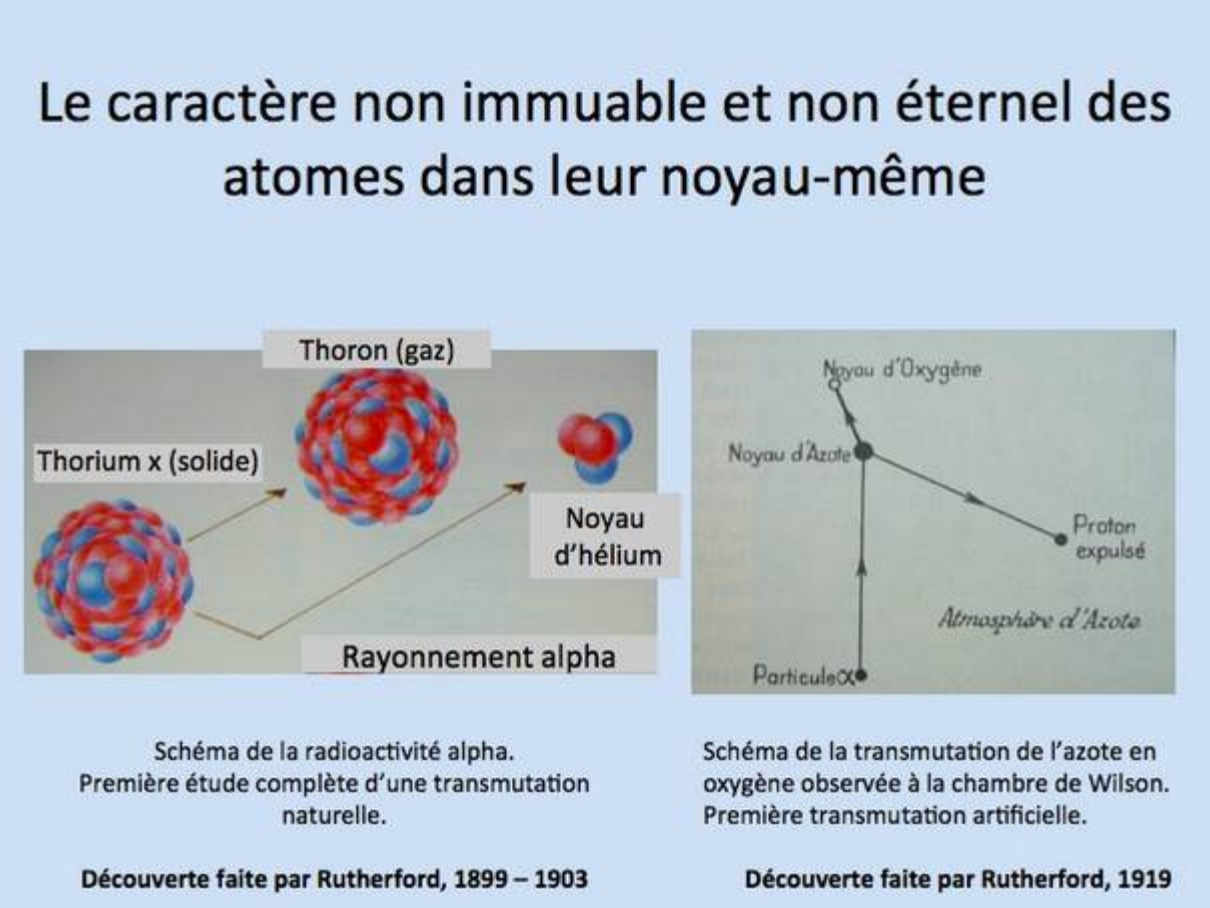
Schéma de l'expérience Rutherford

1.Atomes d'or
2.Particules alpha
3.Particules alpha déviées
4.Particules alpha fortement déviées
5.Particules alpha non déviées

Source: L'horizon des particules Gallimard, 1989

A gauche en bas, le schéma indique une source de particules alpha. Tout ceci renvoie en fait aux travaux expérimentaux et théoriques de Rutherford sur les émissions radioactives spontanées par les corps naturellement radioactifs (en fait tout part du noyau). Notre physicien anglais a découvert à cette occasion et à sa grande surprise qu'il y avait transmutation possible des atomes. C'est ainsi - pour faire court et **pour reprendre son vocabulaire** - qu'un atome de thorium X (un solide métallique lui-même issu du thorium) chauffé se désintègre et donne naissance à un atome de gaz : le thoron…… et à un rayon alpha (qui correspond à un atome d''hélium ionisé), rayon doté d'une grande énergie. Bien entendu dans une réaction il y a toujours beaucoup d'atomes en cause puisque quelques grammes de thorium X contiennent quelque chose comme 10 puissance 20 atomes. Il semble bien que dans la terminologie actuellement en vigueur ; le thorium X correspond au radium et le thoron au radon ……..et que le passage du thorium au radium s'accompagne déjà de l'émission d'un rayon alpha.

Voir la diapositive N° 19



Cette découverte de la transmutation des atomes n'allait pas de soi, c'était complètement contraire à la notion même d'atome. Rutherford fut lui-même momentanément effrayé.

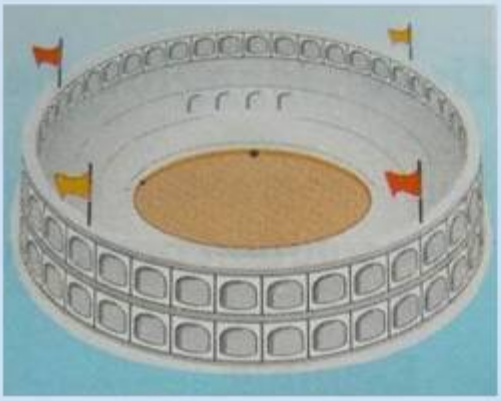
Et notre grand chimiste russe Mendeleïev informé commença par refuser, plusieurs mois durant, toute idée de transmutation malgré les expérimentations…avant de se rallier. Cette hésitation confirme au demeurant la présence en son esprit d'un a priori ontologique en faveur d'un atomisme classique qui affirme l'existence réelle d'un atome authentiquement tel (indestructible et immuable) et qui exclut par principe toute dérivation d'un atome à partir d'un autre. Comme quoi une position a priori très féconde un temps ne l'est plus un autre temps… ou l'inverse, bien sûr.

d. Complétons la description de l'effacement progressif du cadre conceptuel de l'atomisme classique **: on peut dire que le plein est très largement vide et que le vide est en fait —en un sens à bien préciser— toujours et étrangement plein.**

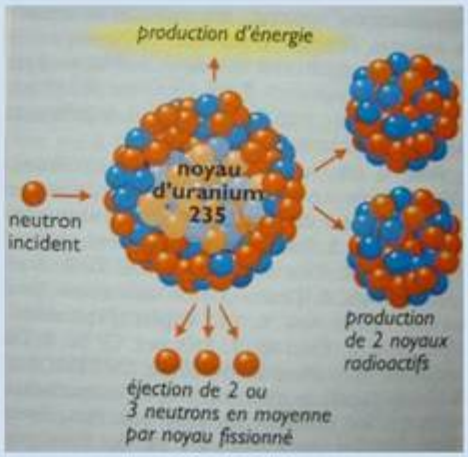
La diapositive N° 20

La diapositive N° 20 côté gauche montre qu'avec le modèle de Rutherford (remanié ensuite par Bohr), l'atome de la physique est essentiellement constitué de vide. …..et c'est pourquoi les rayons très pénétrants peuvent passer sans aucune difficulté dans l'immense majorité des cas. **Une analogie grossière mais très suggestive** empruntée à un manuel de physique permet de visualiser cet immense espace vide……relativement.

L'atome de la théorie physique n'est ni plein, ni insécable

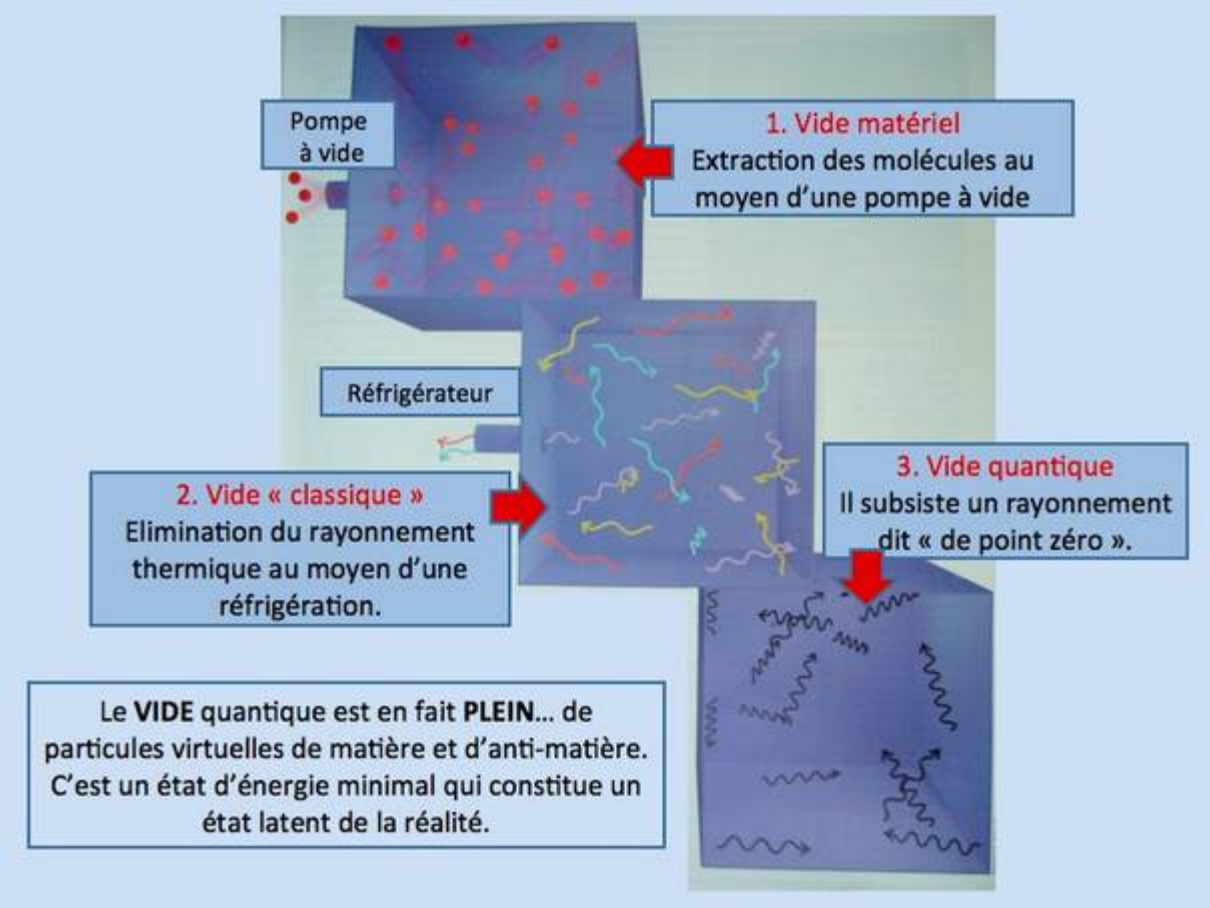


Noyau de l'atome: tête d'épingle au centre.
Cortège électronique périphérique: mur extérieur des arènes. UNE ANALOGIE
Entre les deux: le vide… immense



Fission nucléaire (bombe atomique)

La diapositive N° 21 est —je le reconnais— d'un usage problématique parce qu'elle anticipe probablement de trop sur les programmes de physique dans les années ultérieures et qu'elle mobilise des connaissances scientifiques complexes qu'il est peut-être hasardeux d'indiquer de façon inévitablement sommaire et approximative, en particulier tout ce qui concerne l'antimatière. Cette diapositive a pourtant le mérite de faire apparaître de la façon la plus nette qu'en physique quantique le vide cesse d'être une réalité dénuée de toute détermination et foncièrement passive (comme il l'est dans l'atomisme métaphysique antique et classique où l'activité est strictement réservée aux atomes).



Indiquons pour information que selon Dirac, le grand physicien anglais qui a découvert l'antimatière à l'occasion d'un développement purement théorique de la physique quantique, ce qu'on appelle ordinairement le vide est en réalité une « mer » pleine de particules non-visibles correspondant à tous les niveaux d'énergie négative. SI cette mer est excitée de l'extérieur par une entité qui lui fournit de l'énergie, tel un photon, il se constitue une paire d'électron/positron à la place du photon. Mais cette conception du vide n'est plus actuellement utilisée.

On peut simplement indiquer plus efficacement que des expérimentations scientifiques existent qui montrent que le vide agit et correspond donc à une forme d'énergie (effet Casimir et effet Lamb).

On doit pouvoir plus simplement et plus clairement exploiter au sujet du vide des connaissances en rapport avec le cours de seconde ou présentes dans la culture générale des élèves. La physique nous apprend que de la lumière nous vient des étoiles et que toute lumière se déploie dans un champ électromagnétique. De même on sait par expérience devenue commune qu'un vaisseau spatial communique avec nous quand il se déplace dans l'espace de notre galaxie en particulier dans un déplacement en direction d'une autre planète, et là encore cette communication présuppose un champ électromagnétique. On sait par ailleurs que par définition théorique (les théories en vigueur) l'interaction électromagnétique (et donc en particulier le champ électromagnétique, qu'on peut appeler champ de type classique) concerne et envahit tout l'univers, y compris les espaces intergalactiques. On sait enfin que, de même qu'une particule ne peut jamais être immobile, le champ électromagnétique (selon le formalisme quantique) est toujours agité de fluctuations

correspondant à un degré d'énergie qui n'est jamais nul**. Il y a donc en physique quantique, dans ce qu'on appelle couramment le vide mais qui est en fait rempli au moins du champ électromagnétique, des fluctuations qui peuvent avoir un effet physique.**

Nous sommes ici en présence d'un vide doté d'une activité, ce qui est contraire à la logique du modèle atomiste pur qui implique soit des particules absolument élémentaires et actives, soit un vide absolument vide et passif. Or d'une part, le champ au sens classique est une troisième forme d'être exclue par le système et qui déposséderait d'ailleurs l'atome de son rôle de constituant unique de toute réalité matérielle. Et d'autre part, l'on ne peut pas dire que le vide existe bien qu'il soit complètement et toujours occupé par un champ physique ayant une activité, car il perdrait alors son rôle de lieu d'apparition ou de disparition des êtres y compris le champ, rôle qui présuppose qu'il puisse exister de façon pure et autonome sans être rempli d'aucun champ…. et plutôt souvent que rarement. Précisément le vide au sens absolu doit exister comme « espace » où peuvent se déployer ou cesser de se déployer toute forme d'activité liée à ces êtres physiques qu'il s'agisse de particules ou ici de champs**. Si le vide ne peut plus exister à l'état pur au moins à certains endroits, il n'y a plus de vide au sens fort et strict de l'atomisme antique.** Mais on peut bien sûr rencontrer un vide, au sens ordinaire et disons-le faible, en évacuant toute molécule et atome d'un espace délimité. Cette confrontation avec le modèle antique n'a pas une fonction purement historique ; **elle confirme l'apparition d'un nouveau type d'être qui n'est pas l'atome et qui a en physique autant d'importance que lui : le « champ » (au sens classique). Le champ traduit dans les différentes régions de l'espace l'influence d'une force donnée.** Il n'y a plus d'action à distance mais action de proche en roche par formes différenciées d'influence possible. En effet des différences d'intensité ou de direction se distribuent et structurent tout ce milieu qu'est le champ. Avec ce type d'être à l'opposé du corpuscule, le tout prime la partie.

d. Nos dernières remarques ici s'appuieront sur la culture générale de tous (que d'ailleurs les élèves peuvent identifier et exploiter), pour achever le changement complet d'identité concernant les atomes et les éléments premiers de la matière.

Revenons momentanément à **la diapositive 20 côté droit** ; nous allons y percevoir de façon imagée **la disparition d'une dernière caractéristique structurelle : l'insécabilité du noyau de l'atome**. Mais on peut voir aussi dans cette réaction nucléaire qu'il n'y a plus conservation de la masse, il y a seulement conservation de l'énergie du système. Dans la fission d'un noyau lourd, celui-ci se sépare en quelques noyaux légers animés d'une grande vitesse et donc dotés d'une très grande énergie cinétique. La masse totale des noyaux propulsés est inférieure à la masse du noyau initial. La différence de masse s'est transformée en énergie cinétique.

Ajoutons à cette considération, ce que l'on peut savoir à l'inverse… à partir de la théorie du Big-Bang. L'état premier de l'univers serait une réalité très dense, très chaude, très lumineuse. On serait donc en présence d'une formidable énergie sous forme de rayonnements purs….les premières particules élémentaires électrons et quarks apparaîtraient ultérieurement.

Dès lors, il serait tentant de croire que la réalité fondamentale et première serait l'énergie… et non plus les particules élémentaires dont l'existence serait dérivée. Mais pour les états de très haute énergie, les choses ne sont pas encore très claires pour notre esprit et cela échappe aux moyens

d'investigation expérimentale dont nous disposons.

En revanche, nous en savons un peu plus et depuis longtemps sur **le photon** (particule quantique pour la lumière). Il s'agit d'une particule sans masse. Même remarque pour **le gluon ; le lien particule élémentaire et masse à son tour ne va plus de soi.** Le cas du neutrino reste délicat car si certaines expérimentations lui accordent une masse infime……et nous en sommes actuellement là, la théorie qui a prédit sa découverte continue d'exiger qu'il soit dénué de toute masse. Mais il semblerait ici plus approprié de parler de masse 0.

3. La logique même d'un objet élémentaire premier semble à son tour défaillante dans le cadre de la physique contemporaine. Probable que ce développement ne pourra pas être utilisé en seconde. On peut alors utiliser l'ANNEXE 2 COMME TRANSITION VERS 4. Il importe néanmoins que les collègues de philosophie ne soient pas en état d'ignorance ou plutôt de méconnaissance sur ces problèmes.

Dans cette affaire, ce sont plus simplement les caractéristiques de l'atome qui s'évanouissent, c'est le principe même de son existence qui est atteint. La notion même d'objet élémentaire autonome ontologiquement perdrait sa légitimité théorique. En d'autres termes, on peut légitimement se poser cette question : dans le cadre de la physique contemporaine dite des particules élémentaires, la fonction d'objet en général et surtout celle d'objet premier et fondamental peut-elle être assumée ?

Qu'est-ce qui permet à une chose de revendiquer le statut d'objet par excellence qu'il est possible de connaître parfaitement et dont la connaissance en quelque sorte complète commande toutes les autres connaissances **? Il faut que cette chose soit caractérisée 1) par un ensemble unifié et cohérent de caractéristiques essentielles et 2) par une complète déterminabilité de son existence singulière**. En d'autres termes, peut-être plus simples, il faut que cette chose ait une identité propre parfaitement consistante et une situation relationnelle complétement caractérisable. Nous allons voir que ces deux déterminations font en physique dorénavant défaut.

a. En fait toute réalité phénoménale approchée par la physique quantique a d'abord une identité double.

Prenons le cas du rayon lumineux : en seconde on apprend que c'est une onde électromagnétique qui se propage…qui a donc une longueur d'onde, une fréquence, etc…et qui se déploie dans un champ (classique) électromagnétique. Mais chacun sait que dans l'effet photoélectrique (explication découverte d'Einstein), une plaque métallique chargée électriquement perd certains de ses électrons quand elle est frappée par un rayon lumineux de couleur violette quelle que soit l'intensité de ce rayon. Si c'était un effet du rayonnement lumineux, des rayons de différentes couleurs auraient dû provoquer le même effet de déperdition. Or ce n'est pas le cas. Il faut donc inventer une autre explication en rapport avec la couleur, c'est-à-dire une certaine fréquence de rayonnement. Cette autre perspective conduira à la découverte de l'impact d'une sorte de minuscule grain de lumière qui sera appelé photon, lequel grain est doté d'une grande énergie suffisante pour déloger des électrons.

La lumière est donc à la fois onde (phénomène continu)… et particule (phénomène discontinu). En cela la lumière obéit à deux logiques conceptuelles qui se sont opposé l'une à l'autre plus d'une fois dans l'histoire de l'optique scientifique, s'évinçant l'une l'autre successivement. Un peu plus tard De

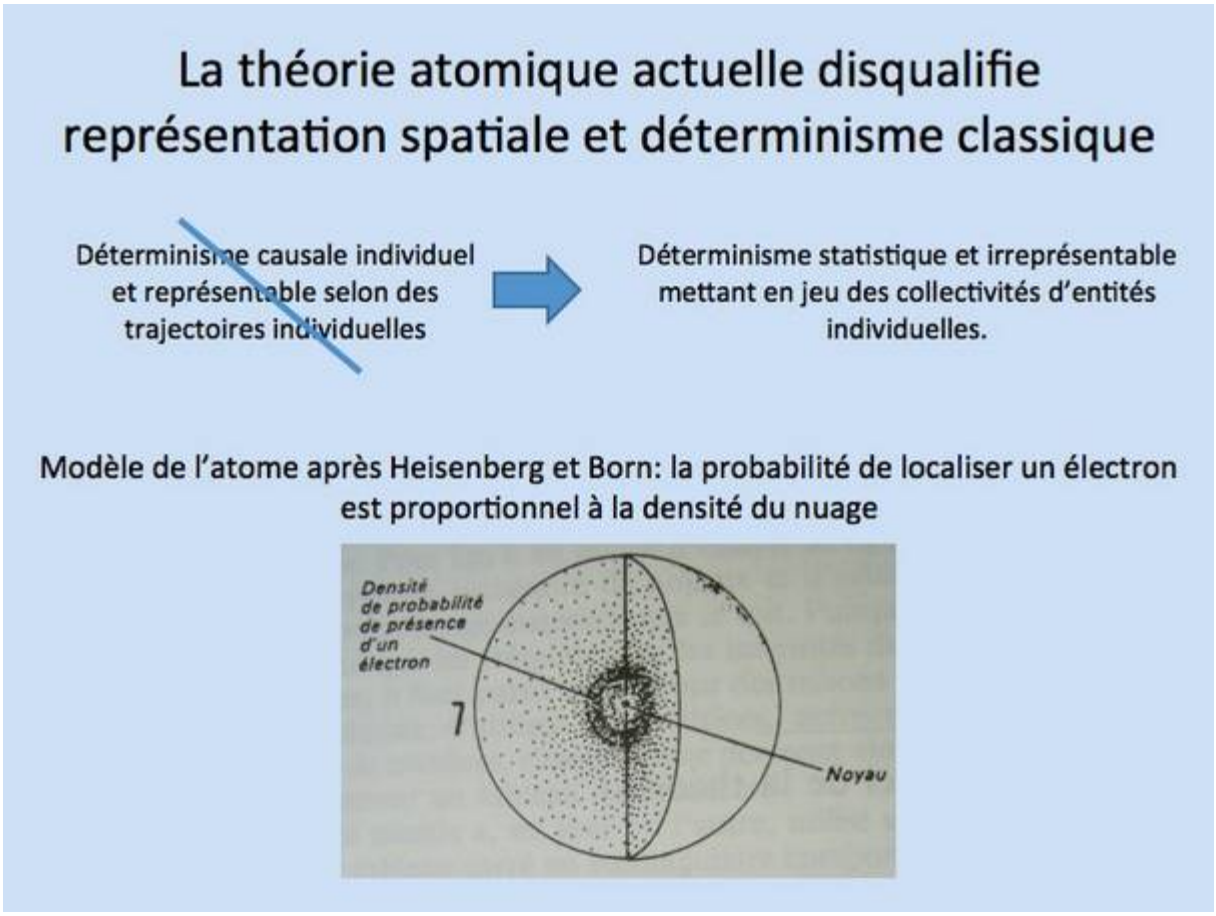
Broglie montrera que la matière que l'on pensait corpusculaire, se présente aussi sous forme ondulatoire ; un faisceau d'électrons peut engendrer un phénomène d'interférence c'est-à- dire une addition qui engendre une annulation (tout comme en leur domaine les rayons lumineux) ; il y a donc aussi des ondes de matière ! On pourrait donc faire ici une analogie un peu audacieuse avec le psychisme d'un schizophrène caractérisé par une conduite paradoxale où il passe brutalement dans ses agissements d'une logique de comportement à une autre logique de comportement tout à fait opposée. Son psychisme est scindé en deux et sa conduite est strictement incompréhensible pour son entourage. Il faudrait alors dire que les réalités physiques (aussi bien lumière que matière) sont eux structurellement et constamment (et non pas dans la conjoncture d'un état pathologique durable) frappé de **bipolarité ontologique**. Mais l'on peut adopter une formulation plus sobre, et dire simplement que **l'être même de ces réalités phénoménales se réduit strictement à un double jeu ontologique permanent. Où se trouve alors l'identité unifiée et cohérente d'un objet ?**

Notons au passage (pour information des professeurs) que Bohr cherchera à dissoudre ou régler ce problème en affirmant avec **le principe de complémentarité** qu'il s'agit en fait de deux perspectives différentes - certes à première vue contraires mais en fait complémentaires - sur une seule et même réalité. La contradiction ne se produit pas si l'on ne mélange pas les deux discours (et les deux approches théorico-expérimentales) ; ils sont tous les deux valables l'un à côté de l'autre mais on doit les tenir tous les deux. Seul moyen d'avoir un discours complet sur l'objet. Bohr s'acharne à montrer qu'à ses yeux cette scission n'existe pas. Mais un problème se pose ici ; en physique une réalité n'existe que pour autant qu'on en parle dans les contraintes conceptuelles d'une approche déterminée : quel discours peut-on tenir sur l'objet unique qui se trouverait en quelque sorte en-deça des perspectives susdites et dès lors qu'on ne peut rien en dire en propre, cet objet unique a-t-il une existence en physique ?

b. <u>Ensuite chaque réalité phénoménale étudiée par la physique quantique n'est jamais abordée à partir d'enquête prenant en compte des individualités prises chacune dans leur situation singulière.</u>

En physique quantique, on a affaire à des individus sans individualité et dépossédés structurellement de tout individualisme. Les atomes déjà, les particules élémentaires ensuite, sont strictement indiscernables**. Indiscernabilité structurelle des particules élémentaires.** D'abord parce que les atomes ou les particules d'une même espèce sont absolument identiques…rien ne permet de les distinguer ; ils ont tous absolument les mêmes caractéristiques et chacun parfaitement. Ensuite, comme ils sont strictement interchangeables au sein d'une collectivité de corpuscules de même espèce, ils sont toujours appréhendés en quelque sorte collectivement. Si l'on revient à l'expérience de Rutherford et donc à l'émission de rayon alpha à partir de quelques grammes de thorium X ou radium, on ne pourra jamais dire que tel atome singulier va émettre un rayon de ce type à un moment donné dans cette direction-là. On dira qu'avec une telle quantité d'atome, il y a d'abord une très forte probabilité d'émission continue et que les probabilités globales d'émission à un moment donné dans une direction donnée sont distribuées selon tel ou tel pourcentage parfaitement calculable.

Se reporter à la **diapositive N° 22**



En physique des particules élémentaires, on ne prend en considération qu'une foule d'entités…et on analyse l'ensemble de façon statistique en tenant compte aussi des effets de foule qui prédisposent en quelque sorte les entités à réagir d'une certaine manière. La physique quantique n'étudie plus principalement telle ou telle particule isolément mais toutes les particules d'un ensemble de particules interagissant entre elles…….. et simultanément le champ complet où se déploient ses particules selon des logiques de groupe identifiables, structurant ce champ au sens classique.

Traditionnellement (en physique classique), parler d'un objet en science, c'est pouvoir lui attribuer à lui seul des relations structurelles avec d'autres objets et pouvoir faire des prédictions individualisées ; c'est donc l'insérer dans des séquences finies d'enchaînement causal strictement individualisé pour ce qui est des éléments pris en compte. En physique quantique, ce déterminisme classique n'est structurellement plus possible et l'on peut se demander si cette disparition n'emporte pas avec elle la notion même d'objet. Qu'est-ce qu'en effet un objet au sens de la science classique sinon en effet un nœud où se croisent de façon permanente et structurée plusieurs types de déterminismes au sens classique ? En oubliant par hypothèse la conception commune selon laquelle la réalité humaine implique des normes et un libre arbitre qui ne se retrouvent pas du tout dans les réalités physiques, faisons l'analogie suivante entre l'objet physique classique et le joueur dans un jeu collectif : y-a-t-il encore un joueur-acteur possible en l'absence d'un ensemble de règles du jeu qui s'appliquent à lui individuellement en déterminant ses formes de conduite ? La disparition des règles s'appliquant aux individus n'anéantit-elle pas l'existence même du joueur comme joueur ?

Nous avons ici pour ce problème de l'objet en physique, comme annoncé précédemment (cf. I B a), n laissé de côté tous les problèmes aigus posé par l'inséparabilité des particules élémentaires.

Pour le problème particulier de l'indéterminisme en physique quantique nous renvoyons en annexe à la note explicative consacrée à une caractérisation succincte de cette nouvelle physique sur cet aspect.

c. **Au terme de cette analyse, nous pouvons avec les élèves faire un constat et peut-être nous poser nous deux questions complètement liées l'une à l'autre.**

Le constat : **la confrontation entre l'atomisme métaphysique et l'atomistique physique (au sens large ; j'y inclus les particules élémentaires) se présente maintenant sous la forme d'un chiasme. Avec l'atomisme métaphysique, nous avons droit à une signification fort claire ayant une cohérence assez forte, mais nous sommes démunis de tout formalisme mathématique précis et de toute capacité prédictive. Avec l'atomistique physique, nous disposons d'un formalisme mathématique très précis et même de capacités prédictives d'une extraordinaire précision (voir la note annexe sur la physique quantique), mais nous avons semble-t-il perdu une signification conceptuelle claire au point que certains physiciens renoncent purement et simplement à comprendre et finissent même par penser que ce renoncement est en sciences physiques une sorte d'heureuse obligation**.

Les deux questions :1) si la notion d'objet élémentaire disparaît en physique, quel est donc l'objet (au sens de corrélat) de la science physique ? De quoi la physique nous parle-t-elle et est-elle la science dure ? 2) si la réalité élémentaire devient problématique quant à sa consistance et à son existence, quelle réalité consistante et effective doit on accorder aux phénomènes naturels étudiés par la physique ? Qu'est-ce qui est structurel et invariant dans la matière ?

4. Pourquoi maintient-on le mot « atome » en physique et de quelle réalité consistante la physique contemporaine nous parle-t-elle ? Ces deux questions peuvent être posées indépendamment de 3. : PRENDRE ALORS L'ANNEXE 2 COMME TRANSITION de 2. VERS 4.

a**. Le mot atome signifiant étymologiquement insécable aurait dû disparaître du vocabulaire de la science. Or il n'en est rien. Pourquoi conserve-t-on à travers le maintien de ce mot une idée de stabilité fondamentale et d'élémentarité première ? Pour deux raisons assez satisfaisantes. On peut faire ici une opération simple et efficace de clarification conceptuelle**.

Primo, en situation ordinaire (par exemple ; pas au sein d'un collisionneur avec la présence de très hautes énergies ; pas dans le contexte d'un appareillage technique lourd provoquant des réactions nucléaires) et avec des atomes qui ne souffrent pas au niveau de leur noyau d'un surcroît d'énergie ou d'un déséquilibre interne (je pense ici aux phénomènes de la radioactivité naturelle qui concernent certains atomes), nous avons affaire à des atomes remarquablement stables sous tendant des réactions de combinaison entre atomes bien déterminée dont la chimie proclame toujours à raison la nécessité et l'universalité. En fait**, dans le cas général, la stabilité d'un système atomique dépend du rapport entre son énergie interne de liaison et les énergies externes des influences qu'il subit. Si donc ces énergies sont beaucoup plus petites que les énergies de liaison, le système atomique se comporte comme une réalité absolument immuable et insécable ; il mérite**

bien son nom.

Secundo, pour identifier les éléments chimiques, on ne peut pas descendre en dessous du niveau de l'atome. L'atome est le plus petit terme dans la division de la matière, où les éléments chimiques conservent leur individualité. Faisons une comparaison, dans une langue, il y a bien un niveau de la plus petite unité ayant une signification, celui du monème ; on peut segmenter plus avant et constater qu'il y a des phonèmes, cela n'annule en rien la valeur de la première remarque. Il faut sans doute ici produire une distinction entre deux sens du mot élémentaire, 1) **« élément de base »** (toujours **relatif** au domaine dont cet élément peut être considéré comme le principe organisateur) et 2) **« constituant ultime »** (correspondant toujours à un **absolu**, l'absolument premier). Les physiciens contemporains usent du mot de « particules élémentaires » en pensant par prudence le sens N°1 (il pourrait bien y avoir de nouvelles strates plus fines d'organisation) mais en ne pouvant pas s'empêcher de rêver souvent au sens N°2 (un esprit aussi exigeant que celui de Dirac ne pourra pas s'empêcher de succomber à un moment à cette tentation).Aussi beaucoup de physiciens contemporains abandonnent le qualificatif « élémentaires » et ne parlent plus que de « physique des particules ».

Il est clair en tout cas que la notion d « élément de base » n'exclut pas par définition la division à l'infini des réalités matérielles et elle a même l'avantage de nous éviter d'avoir à trancher le débat métaphysique sur la divisibilité à l'infini de la matière. Et il peut renvoyer toujours à une stabilité relative et à une élémentarité relative.

Mais si physiquement, en adoptant un regard plus vaste prenant en compte aussi les très hauts degrés d'énergie, la muabilité l'emporte sur l'apparente stabilité des structures atomiques et nucléaires et si par ailleurs, comme nous l'avons établi en 3., toujours dans la physique actuelle, la notion d'objet élémentaire perd à la fois sa consistance intrinsèque et son rôle étiologiquement fondamental, il semble que la notion d'atome et plus encore l'atomisme doivent être en rigueur de termes récusés. Car enfin – rappelons-le – **l'atomisme se caractérise principalement par le primat de l'atome et de ses caractéristiques sur toute forme d'organisation régulière dans les composés ; cette régularité dans l'organisation ne peut être que dérivée et c'est pourquoi l'on parle d'atomisme.** Il me semble indiscutable que cet atomisme au sens strict est mort..... dans **l'état actuel** des théories physiques. Ce qui ne veut pas dire que l'atomisme métaphysique comme modèle explicatif aurait en soi perdu tout crédit et cesserait d'exister ; nullement. L'histoire des sciences et des idées montre d'ailleurs que des modèles plus ou moins en désuétude pendant un temps peuvent retrouver ultérieurement une remarquable fécondité.

Pour élargir et conforter un peu la perspective ouverte ici, il me semble qu'avec la disparition de l'atome comme élément premier et comme cause explicative unique et fondamentale , c'est tout un ensemble de catégories clés qui sont effacés au profit d'autres ; on ne passe pas seulement de **l'élémentarité** à la **structuralité** (nous allons y insister pour finir), nous passons aussi simultanément de **la substance** (au sens ordinaire) à **la relation**, et du **pluralisme** au **monisme**.

Mais alors de quelle réalité consistante la physique nous parle-t-elle ? Je crois que pour répondre à cette question il convient de dissocier, ce que l'atomisme avait associé, les notions de structure permanente et d'entité individuelle (autonome ontologiquement). En fait, la structure permanente

se trouve dans les lois ou invariances qui gouvernent globalement chaque forme d'interaction ayant à la fois un versant particulaire (discontinu) et un versant ondulatoire (continu). Autrement dit**, la consistance qui habite la matérialité et en fait un objet de science ne résiderait plus dans une sorte de granularité élémentaire (qui pour autant n'a pas totalement disparu….mais qui a cessé d'être LE fondamental), mais résiderait plutôt dans les formes invariantes de structuration du tout (incluant les collectivités d'entités d'un côté et les tendances de la vie en collectivité de l'autre**). En d'autres termes encore, l'objet de la physique n'est plus les formes constantes d'une entité fondamentale d'où toute forme d'ordre se déduirait, ce sont les lois fondamentales qui expriment les constances à l'œuvre dans les manières d'agir des entités en collectivité **et** dans la manière d'agir tendancielle du collectif des entités.

Pour revenir à un vocabulaire que les élèves découvriront plus tard, en classe de première je crois ; l'objet de la physique ce n'est pas tant la connaissance de telle ou telle catégorie d'entités physiques par exemple l'électron ou les ondes électromagnétiques lumineuses, ce sont plutôt les lois qui non seulement commandent dans le détail les comportements de ces catégories d'entités et tout le relationnel qui finalement les définit, et même mieux ce sont les principes et les lois fondamentales qui commandent chaque type d'interactions électromagnétiques, forte, faible et peut-être un jour gravitationnelle (si la gravitation parvient à être interprétée de façon quantique)**. Pour faire très court - en revenant à la physique classique et en se situant au niveau de l'atome de Rutherford -**, et pour faire d'une situation classique restreinte et abordable classiquement **la métaphore** d'une situation contemporaine globale et non abordable classiquement, **le consistant véritable en physique ce n'est pas le noyau ou l'électron, c'est la légalité mathématique qui régit la force électrostatique de Coulomb qui structure l'existence même de cette atome.** Cette structure de liaison relie par attraction une toute petite masse chargée négativement à une grosse masse chargée positivement. L'attraction du noyau sur un électron varie de façon inversement proportionnelle au carré de la distance comme varie aussi la force gravitationnelle entre le soleil et une planète. Cette structuration légale impose à l'électron un mouvement circulaire autour du noyau et lui impose aussi de rester imperturbablement relié sauf influences très puissantes venue de l'extérieur…l'ensemble constituant, en termes de stabilité, une remarquable apparence d'atome.

Ainsi donc la réalité stable et fondamentale dont parle le physicien, c'est la structure principielle et nomologique des phénomènes formulée mathématiquement et garantissant leur invariance formelle. **Au couple séparé vide/atomes sans ordre global s'est substitué le couple associé champ/particules dans un ordre global. Dans ce cadre, les particules n'ont pu devenir le vaste et indéfini domaine de recherche que l'on sait que dans la mesure même où la particule, absolument élémentaire et principe de base pour toute explication, s'est éclipsée**.

ANNEXE 1 NOTICE ELEMENTAIRE SUR UN ASPECT CONTROVERSE DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE : l'indéterminisme.

Il ne faut pas se tromper sur l'indéterminisme qui caractérise la physique quantique. BOHR a

d'ailleurs dit à juste titre que **le terme d'indétermination aurait été préférable**. Cette nouvelle physique permet en effet comme la physique classique de faire des prédictions exactes parfaitement corroborées et il faut même souligner que les prédictions de la physique quantique parviennent à des degrés de précision inouïs, jamais atteints jusqu'alors. En réalité, avec cette nouvelle physique on passe tout simplement d'un type de déterminisme à un autre **; on quitte le déterminisme causal et représentable des processus individuels pour un déterminisme statistique et irreprésentable de collectivités d'individus.** J'entends par représentable qu'on peut en avoir un aperçu intuitif, c'est à dire qu'il est figurable par des trajectoires dans un cadre spatio-temporel classique [le mot intuitif changera de sens avec HEISENBERG et PAULI sous l'influence de la conception hilbertienne des mathématiques]. J'entends par individus non pas des personnes mais des entités individuelles comme l'électron, le proton, le photon, le neutrino, les quarks, etc. Par exemple – dans le cadre de toutes les théories quantiques –on ne peut pas et on ne pourra jamais dire à quel moment et dans quelle direction un seul rayonnement radioactif alpha pourra être émis à partir du noyau d'un atome ; en revanche pour un grand nombre d'atomes radioactifs et pour un laps de temps déterminé, on peut établir le pourcentage exact des différents types de radiation alpha selon les directions et les moments qui se produiront effectivement. Cette impossibilité d'accéder aux parcours individuels a pour fondement **les relations d'incertitudes formulées par HEISENBERG,** comme quoi pour un individu du domaine atomique ou subatomique, on ne peut jamais atteindre en même temps des informations fiables sur sa position et sur sa quantité de mouvements [cette quantité, c'est la masse multipliée par la vitesse]. Le degré de précision pour la première information est inversement proportionnel au degré de précision pour la seconde. Cette affirmation n'est pas un constat de fait ; elle résulte par démonstration des contraintes incontournables de la théorie quantique. Indéterminisme ne veut donc pas dire absence totale de déterminisme, mais simplement impossibilité en droit de continuer à pratiquer pour les réalités ultra minuscules le déterminisme classique. Celui-ci présuppose en effet, que l'on recueille au départ des informations complètes et précises sur un individu physique. Quand donc on parle de liberté d'un électron, cela ne veut pas dire libre arbitre. Cela veut simplement dire que son activité est non déterminée causalement et localement ; mais elle est rigoureusement déterminée d'une autre manière de manière statistique.

ANNEXE 2 TRANSITION ENTRE III 2 et III 4 EN CAS DE SUPPRESSION DE III 3.

1) La dislocation de l'identité de l'atome s'accompagne de l'apparition d'une multiplicité de particules souvent appelées « élémentaires » mais plus jamais appelées « atomes » (on ne veut plus affirmer qu'elles ne seront jamais décomposables) : prudence théorique oblige ! neutrino, muons, tauons, gluons, bosons, quarks, etc.

2) Mais à côté de ces particules, il y a toujours ce qu'on appelle des « champs ». Nous avons vu que dans le cours de physique de seconde on parlait de la lumière en termes d'ondes (électromagnétiques en l'occurrence) qui par définition se propage dans une sorte de milieu qu'on appelle un champ (au sens classique de ce terme). L'une des grandes découvertes de la nouvelle physique (quantique), c'est d'avoir montré a) avec Einstein que la lumière n'est pas simplement

ondulatoire mais tout autant corpusculaire (découverte du photon) b)avec De Broglie que la matière n'est pas simplement corpusculaire mais tout autant ondulatoire (découverte des ondes de matière). En d'autres termes, dorénavant en microphysique toute réalité matérielle se présente à la fois sous forme de particules (pour certaines de leurs propriétés) et sous forme d'ondes (pour d'autres propriétés). Ce sont selon Bohr les deux versants complémentaires d'une même réalité : principe de complémentarité. Il n'en reste pas moins qu'avec deux versants-visages à ce point différents, on ne sait plus quelle est l'identité exacte de la réalité matérielle fondamentale. La consistance intrinsèque de cette identité s'est évanouie.

3) D'autre part ces particules et ces ondes sont toujours régies par des lois physiques spécifiques qui pour les particules d'un même groupe commandent leurs interactions réciproques et qui pour les ondes d'un même groupe commandent dans un champ (au sens classique) les formes tendancielles d'interactivité possible. Plus globalement, les particules et les ondes en jeu dans une même interaction sont regroupées dans un même champ (en un sens nouveau : un champ quantique qui n'est plus lui caractérisé par la continuité) et obéissent à un même type d'opérations mathématiques fondamentales (un groupe dit de transformation) garantissant une stricte invariance pour les formes de structuration légale de tous les phénomènes propres à cette interaction.

4) Pour revenir au seul aspect des particules, dans ce nouveau cadre global du champ quantique, les particules ne peuvent plus jamais être en même temps précisément déterminées dans toutes les dimensions mesurables qui les caractérisent (cf ANNEXE 1). De ce fait, le déterminisme classique des processus individuels est rendu impossible. On le remplace par un déterminisme statistique global, prenant toujours en considération une immense population d'individus afin de déterminer avec une formidable précision les taux de probabilité pour tel ou tel événement physique déterminé. Ainsi donc ici pour expliquer les phénomènes on ne raisonne plus à partir de l'élémentaire, mais à partir du tout. Dans l'organisation de l'explication scientifique, l'élémentaire n'est plus LE fondement.

ANNEXE 3 BIBLIOGRAPHIE portant uniquement sur l'entrée « science » de la thématique.

LIVRES RELATIVEMENT PETITS :

E.KLEIN, *Les secrets de la matière*, Plon

Collectif, *La matière aujourd'hui*, Points Seuil

B.BENSAUDE et C.KOUNELIS, *Les atomes. Une anthologie historique*, Press Pocket.

M.CROZON, *L'univers des particules*, Points Seuil.

J.PERRIN, *Les atomes*, champs Flammarion.

B.DIU, *Les atomes existent-ils vraiment ?,* O.Jacob

J.M.LEVY-LEBLOND, *De la matière*, Seuil.

A.LE NOXAÏC, *Les métamorphoses du vide*, Belin Pour la science.

LIVRES ASSEZ VOLUMINEUX :

J.P.BATON et G.COHEN-TANNOUDJI, *L'horizon des particules*, Gallimard.

B.D'ESPAGNAT et E.KLEIN, *Regards sur la matière*, Fayard.

G.COHEN-TANNOUDJI et M.SPIRO, *La Matière-Espace-Temps*, Fayard.

M.CROZON, *La matière première*, Points Seuil.

M.PATY, *La matière dérobée*, Éditions des archives contemporaines.

M.BITBOL, *L'aveuglante proximité du réel*, champs Flammarion.

LIVRES D'HISTOIRE DES SCIENCES :

B.POURPRIX, *D'où vient la physique quantique ?*, Vuibert

E.SEGRE, *Les physiciens modernes et leurs découvertes*, Fayard

M.KUMAR, *Le grand roman de la physique quantique*, JC Lattès

C.LECAILLE, *L'atome chimère ou réalité : débats chimie du 19° siècle*, Vuibert.

F.BALIBAR, *Einstein 1905, de l'éther aux quanta*, Puf.

ARTICLES OU REVUE :

G.BACHELARD, *Noumène et microphysique*, *in* « Etudes », Vrin.

Les cahiers de Science et Vie, *Atomes : une guerre de cent ans*, Hors-série déc. 1997.

B.BENSAUDE-VINCENT, *La genèse du tableau de Mendeleïev*, La Recherche oct. 1984.

A.BARBEROUSSE et P.LUDWIG, *Les modèles comme fictions*, Philosophie N°68 déc. 2000

Sciences et Avenir, Les énigmes du vide, Hors-série nov. déc. 1997.