

Avertissement

Le texte qui suit est en fait un ensemble de notes de préparation pour la formation à l'enseignement des sciences physiques des formateurs des Centres de Formation d'Apprentis du Bâtiment-Travaux publics. Ces formations se sont déroulées au cours des années 90.

Il s'agit donc de contenus disciplinaires et didactiques destinés à des enseignants et non à des élèves. Néanmoins ces enseignants ont comme public des apprentis visant un diplôme de niveau V aussi, si ces notes ne collaient pas aux programmes de chimie des C.A.P. ou B.E.P. elles ne pouvaient en être totalement indépendantes. On peut en dire aujourd'hui la même chose au regard des programmes actuels de C.A.P. et de B.E.P.

C'est ainsi que le lecteur trouvera de temps à autre des indications d'activités possibles à réaliser avec ou par les élèves. Les expériences rapidement décrites sont le plus souvent réalisables par les élèves mais certaines nécessitent le respect de règles de sécurité qui ne sont pas précisées.

Le but principal de ces notes est de concrétiser une trajectoire didactique d'enseignement de la chimie qui renverse celle qui est le plus souvent suivie et qui a révélé ses limites. Il s'agit donc de passer de l'approche macroscopique de la matière et des réactions chimiques au modèle submicroscopique (atomistique) en respectant, autant que faire se peut, une démarche scientifique de modélisation.

Ces notes s'inspirent de travaux de recherches en didactique de la chimie qui se sont déroulés au cours des années 80 et qui portaient en particulier sur la construction du concept d'espèce chimique et celle du modèle particulaire. J'ai eu le plaisir d'y participer, notamment pour en tester la pertinence pour des élèves préparant un C.A.P., avec le professeur G. SOUSSAN de l'université PARIS XIII pendant l'année scolaire 87-88.

Alain FOUCART

Les espèces chimiques

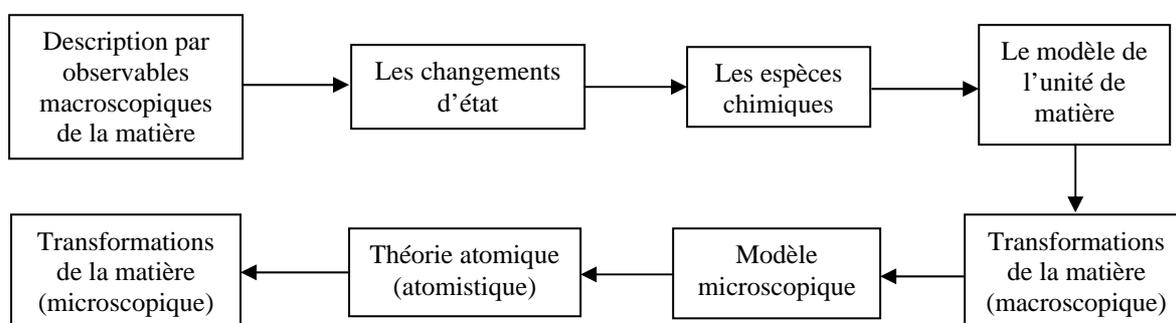
L'objet de la chimie :

- décrire l'état et/ou les états de la matière
- les transformations de la matière

Décrire doit être entendu dans un sens large :

- description à l'aide d'observables ;
- modélisation ;
- théorisation scientifique.

Trajectoire didactique possible :



1. Description de la matière à l'aide d'observables macroscopiques

La première question qui peut se poser concerne le langage : de quel vocabulaire disposons-nous pour décrire la matière à l'état macroscopique ?

Demander aux élèves de proposer de tels mots et en faire un classement qui fait apparaître ceux qui désignent des objets, des matières, des familles de matières et les états de la matière.

Le souci de bien fixer la « quantité » de matière à étudier conduit à introduire l'idée de système chimique (à relier avec les systèmes mécaniques et électriques ainsi qu'avec les notions d'interactions internes et interne-externe).

Expérience :

Objectif : faire émerger des mots qui permettent la description de systèmes chimiques.

Un présentoir comportant 6 tubes à essais et contenant :

tube 1 : eau – tube 2 : eau + huile (d'abord au repos puis agitée) – tube 3 : eau + alcool –
tube 4 : eau colorée + sable – tube 5 : encre – tube 6 : eau + sable + soufre

Demander aux élèves de décrire et classer les tubes ;

Savoirs structurés visés : vocabulaire

A partir du classement : systèmes homogènes et systèmes hétérogènes (phases et états de la matière)

A partir des descriptions : mélange, solution, solubilité, insoluble, émulsion, suspension, ...

2. Séparations des matières

Un vocabulaire étant en place, la problématique de la description de la matière ou des matières se développe autour de la question qui préoccupa très tôt l'humanité (voir l'histoire de la chimie¹) : existe-t-il une quasi infinité de matières de base ou au contraire un nombre limité, les autres matières n'étant que des combinaisons de ces matières de base ? Pour le moment on appellera « élément » ces matières de base.

Il s'agit donc de tenter de séparer les matières jusqu'à ce que l'on ne puisse plus le faire :

- tout d'abord à l'aide de transformations physiques qui ne modifient pas les matières séparées ce qui conduira à la notion d'espèce chimique ;
- puis à l'aide de transformations chimiques qui préservent cependant la quantité de matière ce qui conduira à la notion d'élément chimique.

On partira de systèmes hétérogènes, il s'agit alors de séparer les phases pour obtenir dans un premier temps des systèmes homogènes.

Techniques de séparation de systèmes hétérogènes : décantation, filtration, centrifugation, ... (on pourra s'inspirer d'une partie de la séance sur le site réalisée par W. SALSI) – Questionnement possible avec les élèves : comment peut-on séparer une phase liquide d'une phase solide ? une phase liquide d'une autre phase liquide ? une phase solide d'une autre phase solide ? Les questions relatives aux phases gazeuses sont un peu plus délicates car elles nécessitent des systèmes chimiques pris dans des enceintes closes.

A partir d'un système homogène il faut alors s'interroger : s'agit-il d'un mélange ou d'une espèce chimique ?

Techniques de séparation de systèmes homogènes : distillation, chromatographie

Expériences : distillation

Matériels : ballon avec bouchon à 2 trous – chauffe-ballon – thermomètre – tube à dégagement – tube à essais dans un verre d'eau – quelques mL d'encre – quelques grains de pierre ponce ou de porcelaine ou de terre cuite (pour réguler l'ébullition)

chromatographie

Matériels : un bocal d'au moins 20 cm de haut avec 2 à 3 cm d'eau au fond – une bande de papier joseph de 4 à 5 cm de largeur terminée en pointe, accrochée à un support posé sur le haut du bocal afin que la bande ne touche pas les parois – la pointe de la bande touche l'eau et

on aura déposé sur la bande à 4 cm de la surface de l'eau une tache d'encre (stylo feutre noir par exemple). On observe la séparation des pigments de différentes couleurs composant l'encre noire.

A l'issue de ces différentes techniques de séparation on admet que l'on est arrivé au stade de l'**espèce chimique**. On montre alors des conditionnements de différentes espèces chimiques ainsi que les étiquetages. On remarque alors sur certaines étiquettes, notamment celles des espèces chimiques simples, l'indication d'un **degré de pureté** d'où l'idée qu'une espèce chimique réelle contient toujours des impuretés. On peut réaliser l'expérience de la sublimation d'un grain d'iode (sous hotte) ; chauffer lentement dans un tube à essais un grain d'iode, l'iode se sublime et repasse à l'état solide en haut du tube à essais et à l'issue de la sublimation il subsiste au fond du tube quelques impuretés.

3. Mélange et espèce chimique

Subsiste la question : qu'est-ce qui nous permet d'affirmer qu'un système homogène est une espèce chimique ? comment répertorie-t-on les espèces chimiques ?

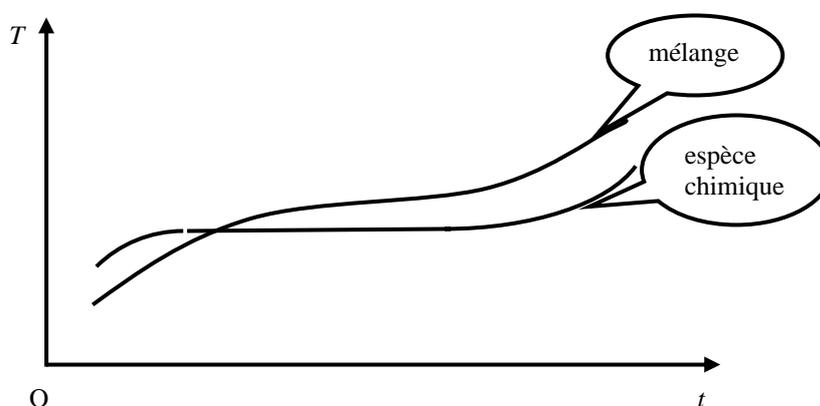
On peut demander aux élèves de regarder dans un dictionnaire ce qui est indiqué pour quelques espèces chimiques : eau, dioxygène, acide chlorhydrique, ammoniac, ... et remarquer ainsi les **constantes physiques** (constantes de changement d'état en particulier).

Expérience :

Objectif : vérifier qu'une constante physique est modifiée quand on passe d'une espèce chimique à un mélange d'espèces chimiques.

Exemple à réaliser sous la hotte et de préférence avec du matériel EXAO : changements d'état du naphthalène puis du paradichlorobenzène et enfin d'un mélange des deux espèces.

Solide \longrightarrow liquide on relève $T(^{\circ}\text{C}) = f(t_s)$



¹ Bernard VIDAL – *Histoire de la Chimie*, Que-sais-je ?, P.U.F.

Savoir structuré : on répertorie les espèces chimiques avec les constantes physiques et notamment les températures de changement d'état à pression normale.

On peut faire établir par les élèves quelques « cartes d'identité » d'espèces chimiques déjà rencontrées (eau, acide chlorhydrique) avec un dictionnaire pour l'eau et une recherche sur Internet pour les autres espèces.

Le modèle particulaire de l'unité de matière

Problème : Comment peut-on expliquer les changements d'états d'une espèce chimique, notamment lorsque l'espèce chimique est à l'état gazeux ?

On peut décrire le phénomène à partir des observables (grandeurs) volume, masse et température et constater les propriétés mais pas expliquer un changement d'état, il faudrait pour cela une connaissance plus intime de la matière (évoquer les possibilités et les limites des microscopes).

Nous sommes conduits à imaginer ce que peut être la matière au delà de l'observable pour interpréter les propriétés macroscopiques et en particulier la pression lorsque la matière est à l'état gazeux. Il faut néanmoins que le modèle que nous imaginerons soit compatible avec les observations que nous pouvons faire par ailleurs et avoir une valeur prédictive lorsqu'on le fait fonctionner².

Résumé de la méthode :

- nous ferons l'hypothèse d'un modèle ;
- nous le confronterons avec les propriétés déjà connues de la matière ;
- nous le ferons fonctionner pour prévoir des résultats ;
- nous contrôlerons la validité des prédictions par la voie expérimentale.

Modèle :

1. l'espèce chimique est constituée d'unités de matières semblables liées entre-elles (hypothèse de la discontinuité).
2. suivant l'état de la matière le lien entre deux unités de matière est plus ou moins fort donc plus ou moins difficile à rompre (ce lien est une énergie d'interaction et pas un lien matériel).

A ce stade on demande aux élèves de décrire les espèces chimiques dans leurs différents états à l'aide du modèle et faire le lien avec les grandeurs physiques observables V , M et T .

M —————> $n \times m$ (nombre d'unités de matière fois la masse d'une unité)

V —————> distance entre les unités de matière et liens plus ou moins intenses

T —————> agitation, vitesse des unités de matière

On peut coder et figurer les unités de matière. Exemple : représenter l'eau solide, liquide puis gazeux et aussi l'iode (si on l'a utilisée précédemment).

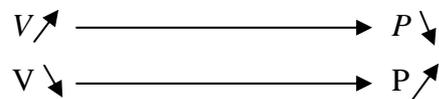
² G. ROBARDET et J-C GUILLAUD, *Eléments de didactique des sciences physiques*. P.U.F., 1997

3. Prédiction : on peut ici interpréter la pression d'un gaz sur une paroi comme le « bombardement » par les unités de matière d'une certaine surface de la paroi (faire l'expérience d'un bécher recouvert d'un morceau de ballon de baudruche après avoir déposé une aspirine effervescente dans de l'eau. Cette expérience sera interprétée ultérieurement, dans un premier temps on se contente d'observer l'action du gaz sur la paroi déformable, la déformation concrétisant l'existence de la pression)

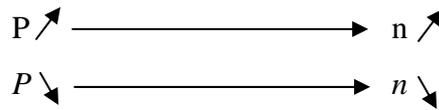
Nous ferons fonctionner le modèle dans le cas des gaz.

A l'aide du modèle essayer de répondre aux questions qui suivent (tâche élève).

- la masse du système considéré étant constante : comment peuvent varier le volume et la pression à température constante ?



- à volume et température constants : comment peuvent varier la pression et la masse ou encore le nombre de particules ?



4. Validations expérimentales

- avec du NO_2 dans une seringue n et T sont constants
on comprime ou détend le gaz d'où les variations de P et V
- on reprend l'expérience de l'aspirine effervescent, on a V et T constants
d'où les variations de n (ou m) et P

Conséquences du modèle

Le nombre d'Avogadro est le coefficient de proportionnalité qui relie le monde macroscopique et le monde du modèle submicroscopique

$$N = 6,02 \times 10^{23}$$

La mole est l'unité de quantité (d'unités) de matière

La masse molaire d'une espèce chimique est la masse d'une mole d'unités de matière soit :

$$M = N \times m \quad (m \text{ masse d'une unité de matière})$$

Réactions chimiques – Atomes

Constatations macroscopiques

Certaines espèces chimiques soumises à des conditions particulières de température et de pression se transforment en deux (ou plus) autres espèces chimiques.

Lorsque l'on met en présence deux espèces chimiques avec ou sans conditions particulières de température et de pression selon les cas on peut avoir ou pas transformation en une ou deux (ou plus) autres espèces chimiques ; la transformation peut être totale ou partielle.

On peut avec les élèves leur faire évoquer des réactions chimiques qu'ils ont déjà rencontré dans leur scolarité ou dans leur vie sociale et familiale. On peut aussi leur en faire réaliser quelques unes. Enfin si cela paraît opportun, essayer de faire un classement.

Problématique

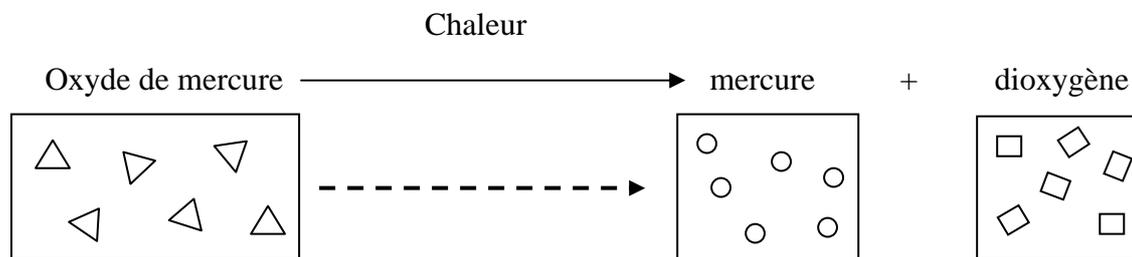
Deux questions se posent :

1. Pourquoi une espèce chimique est-elle en mesure de réagir avec certaines et pas avec d'autres (première notion d'affinité chimique) ?
2. Lorsqu'une réaction a lieu comment peut-on en expliquer le mécanisme ?

Une fois de plus, nous pouvons constater des réactions voire par expérience faire émerger des propriétés (Exemple : réactions des acides sur les métaux) mais on ne peut expliquer le mécanisme réactionnel, le modèle particulaire ne nous est d'aucune utilité, il faut envisager de le faire évoluer, de le complexifier.

On peut prendre l'expérience de Lavoisier comme point de départ qui permet aussi de distinguer les espèces chimiques simples des espèces chimiques composées.

Figuration du problème



Le modèle atomique

La seule façon de pouvoir interpréter la réaction est d'imaginer, de faire l'hypothèse, que l'unité de matière est constituée d'éléments interagissant et qu'au cours de la réaction chimique les liens sont rompus, que les éléments se dispersent et se réarrangent avec d'autres

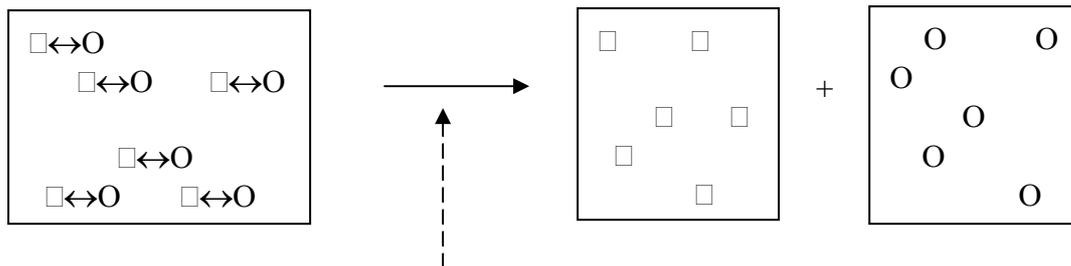
liens pour donner d'autres espèces chimiques. Si l'hypothèse est valide on répond ainsi de manière satisfaisante à la deuxième question.

Décidons pour le moment d'appeler les éléments constitutifs de l'unité de matière **atomes**.

Conséquences déductibles de l'hypothèse : une unité de matière est constituée d'un ou plusieurs atomes qui peuvent être *a priori* identiques (espèces chimiques simples) ou différents (espèces chimiques composées). Le lien entre deux atomes sera appelé énergie interatomique.

Unité de matière = atome(s) + énergie(s) interatomique(s) (si au moins deux atomes)

Figuration sur un exemple (qui ne va pas au delà de ce que peut dire le nouveau modèle)



énergie de réaction

Il faut d'autres réactions et analyses pour connaître la composition des espèces chimiques simples : 1 ou plusieurs éléments

Deux concepts fondamentaux de la chimie apparaissent ici :

- l'énergie réactionnelle :
 - énergies de liaisons avant réaction ;
 - énergie d'activation (qui ne participe pas au bilan énergétique de la réaction) ;
 - énergie de liaisons après réaction.
- l'affinité :
 - atomique d'un élément ;
 - électronique

énergies d'émission ou de capture du 1^{er} électron, du 2^{ème} électron, etc.

La validité du modèle est vérifiée par sa capacité à expliquer des réactions chimiques.

Notion d'élément

On appellera élément chimique une unité de matière permanente dans une chaîne de réactions chimiques.

Exemple : cas de l'élément cuivre

Copeaux de cuivre dans de l'acide sulfurique, puis ajouter de la soude, puis déshydrater, enfin dessiquer. D'où la chaîne $\text{Cu} \longrightarrow \text{CuSO}_4 \longrightarrow \text{Cu(OH)}_2 \longrightarrow \text{CuO} \longrightarrow \text{Cu}$

Conséquence : la loi de conservation des masses (émise par Lavoisier)

$$\Sigma m \text{ des réactifs} = \Sigma m \text{ des produits}$$

Symbolisation

a) des éléments

92 éléments + éléments artificiels

classification périodique des éléments

chaque élément est symbolisé par une ou deux lettres (majuscule + minuscule)

chaque case de la classification contient les informations suivantes : le numéro atomique (dont la signification sera abordée ultérieurement) – le symbole de l'élément – la masse atomique (en tenant compte des isotopes).

b) des espèces chimiques

Le symbole d'une espèce chimique est construit avec les symboles des éléments et leur nombre qui entrent dans la composition. On peut parfois symboliser les liaisons (covalence, double liaison, triple liaison, ...)

Les équations de réaction

Conservation des éléments	}	Balancement de l'équation
Conservation des masses		

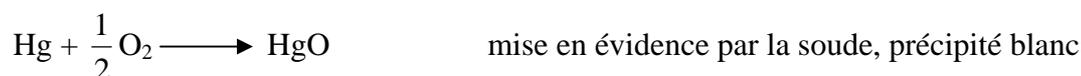
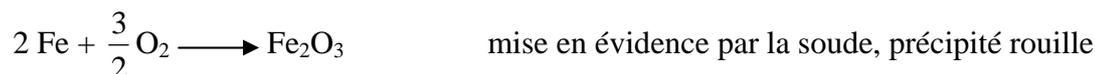
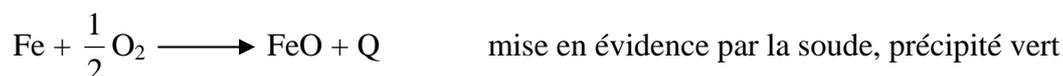
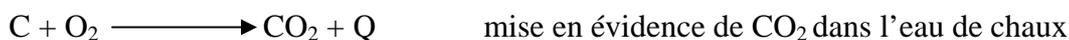
Réinvestissements

Expliquer des réactions chimiques (schémas, équations de réaction, calculs de masses, calculs des énergies de réaction, ...)

Pour les élèves on peut en guise de réinvestissement des apprentissages travailler sur les combustions. Carbone et métaux dans l'oxygène

Expériences :

Carbone (poudre de graphite), fer (fil de faible diamètre avec au bout un petit morceau d'amadou pour l'inflammation), magnésium (ruban enflammé dans l'air)



Réactions chimiques – Ions et électrons

Problème :

Comme précédemment nous allons montrer que les propriétés observables de la matière constatées dans le domaine macroscopique ne peuvent trouver explication avec le modèle particulaire tel qu'il est actuellement construit (c'est-à-dire : unité de matière = atomes + énergies de liaison). Il convient alors de faire évoluer le modèle en le complexifiant.

Propriétés électriques de la matière

On s'intéresse ici au phénomène d'électrisation. On peut alors par expérience classer les matières solides en conducteurs et isolants puis à nouveau classer selon les comportements des matières en électricité + et électricité - (convention). On passe ensuite aux matières liquides (électrolytes et autres).

Cette partie peut être développée selon les formations afin de construire un premier niveau de conceptualisation sur :

- le transfert d'électricité ;
- la neutralité électrique.

Les expériences sont réalisées de préférence avec des espèces chimiques ce qui permet de construire en parallèle les modèles massique et électrique puisqu'ils doivent être compatibles et rendre compte des phénomènes observés.

Ayant fait l'hypothèse de la discontinuité de la matière (et on a pu constater la fécondité de cette hypothèse) on fait l'hypothèse de la discontinuité de l'électricité et donc l'hypothèse de l'existence d'une unité de quantité d'électricité ou encore quantité d'électricité minimale.

L'exigence de compatibilité des deux modèles conduit à admettre que cette quantité d'électricité minimale (qui se manifeste phénoménologiquement dans certaines conditions) est transportée par l'unité de matière et même plus sûrement par les atomes qui la constituent.

La combinaison des concepts de transfert d'électricité, de neutralité électrique, de l'existence de deux types d'électricité (+ et -) et le modèle (atomes + énergies de liaison interatomiques) conduit à faire l'hypothèse d'un nouveau modèle tel que :

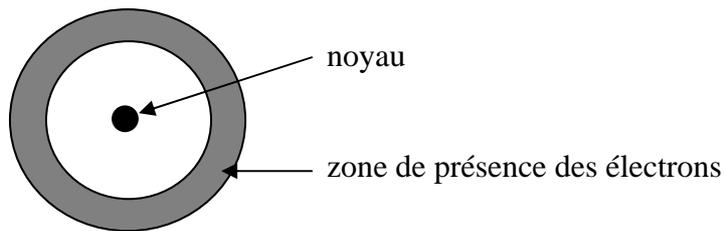
$$\text{atome} = \text{noyau} + \text{électron(s)} + \text{énergies intratomiques}$$

A ce stade d'élaboration il est impossible de préciser le nombre d'électron(s) que comporte l'atome, tout au plus on peut imaginer qu'il y en a probablement plusieurs.

Les conséquences que l'on peut alors envisager sont les suivantes :

- le noyau transporte un type d'électricité et le ou les électrons l'autre type (par convention on choisit que les électrons transportent l'électricité -) ;
- la quantité d'électricité portée par le noyau est égale à la quantité d'électricité portée par les électrons ;
- l'électrisation serait un transfert d'électrons qui provoquerait un déséquilibre en quantités d'électricité entre deux matières.

Figuration du modèle



A ce stade on peut encore pousser la réflexion. Attention néanmoins au problème de la transposition didactique car c'est notre connaissance du modèle plus complet qui nous pousse, il n'est pas sûr que celui qui ne sait pas nous suive dans cette démarche de reconstruction *a posteriori* : c'est peut être envisageable avec des élèves qui ont suivi toute la scolarité au collège dans la mesure où ils ont déjà au moins entendu les noms des objets qui constituent le modèle.

L'existence de « grain » d'électricité peut laisser penser que le noyau porte le même nombre de grains positifs qu'il y a d'électrons, d'où l'idée que le noyau est lui-même constitué de particules : les nucléons.

Afin de rendre compatibles les lois sur la neutralité électrique de l'atome et sa masse on est conduit à proposer deux types de nucléons de même masse mais dont certains transporteront un « grain » d'électricité – le proton – et d'autres n'en transporteront pas – le neutron –

$$\text{noyau} = \text{protons} + \text{neutrons} + \text{énergies d'interaction entre nucléons}$$

Le modèle est validé par sa capacité d'explication et de prédiction des phénomènes concernant les conducteurs solides, liquides, les ions, le test de conductibilité, etc.

Quelques mots ici sur les ions. Il est possible de faire des manipulations de test de présence d'ions (voir n'importe quel manuel de chimie pour le niveau V).

Les réactions électro-chimiques

Nous étudions dans ce chapitre les réactions acido-basiques et les réactions d'oxydo-réduction.

L'approche avec les élèves de niveau V peut être uniquement macroscopique, la formulation des concepts d'acide, de base, oxydant et réducteur peut rester très simple et ne pas mettre en jeu le modèle atomique, en particulier pour les élèves de C.A.P.

Réactions acido-basiques (en solution aqueuse)

1. Classification des matières avec le papier pH ou l'indicateur universel et l'échelle de pH.

Expérience :

Liste des substances : jus de citron, coca-cola, vinaigre, eau déminéralisée, lait, salive, « Destop » très dilué, solution d'acide chlorhydrique diluée, solution d'hydroxyde de sodium diluée. Ajouter 1 ou 2 gouttes d'indicateur universel dans quelques cm³ de chacune des substances. D'où le classement en trois classes : acides, bases, neutres + échelle de pH en fonction des couleurs.

2. Conductibilité électrique.

Expérience : le test de conductibilité électrique montre que les solutions aqueuses d'acides et de bases sont des solutions ioniques.

A l'aide du modèle atomique on indique que les acides libèrent des ions hydronium [H₃O]⁺ et que la concentration de ces ions dans la solution est liée au pH ; $\text{pH} = \log [\text{H}_3\text{O}]^+$

Les bases libèrent quant à elles des ions hydroxydes [OH]⁻ et l'on a la relation :

$$[\text{H}_3\text{O}]^+ \times [\text{OH}]^- = 10^{-14}$$

Le modèle de Brønsted qui est plus complexe se fonde sur l'échange de protons.

3. Action des acides sur les métaux

Expérience : réaliser les réactions d'acides froids et dilués sur quelques métaux usuels (ce qui se trouve décrit dans tous les ouvrages scolaires de niveau V) puis faire interpréter au moins l'une des réactions avec le modèle.

Exemple : acide chlorhydrique + zinc \longrightarrow ion chlorure + ion zinc + gaz dihydrogène + Q

$$2 \text{HCl} \quad + \text{Zn} \quad \quad \quad 2 \text{Cl}^- \quad + \quad \text{Zn}^{++} \quad + \quad \text{H}_2 \uparrow \quad + \text{Q}$$

Mais l'acide chlorhydrique est une solution ionique que l'on peut aussi écrire soit H⁺ + Cl⁻ soit encore H₃O⁺ + Cl⁻

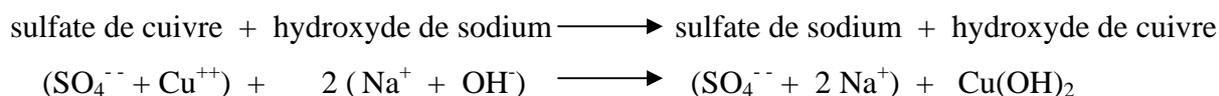
La présence de l'ion chlorure est attesté par le nitrate d'argent et l'ion zinc par l'hydroxyde de sodium (voir les tests d'ions). Les ions chlorures sont spectateurs dans la réaction aussi l'équation de la réaction peut se réduire à :



4. Action des bases sur les ions métalliques

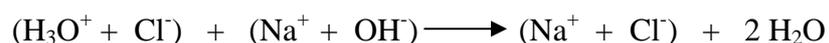
Expérience : faire réagir du sulfate de cuivre, du chlorure de zinc, du chlorure de fer (sel de Mohr dilué) et du chlorure de nickel avec de l'hydroxyde de sodium. D'où les précipités. Faire interpréter une réaction au moins.

Exemple :



5. Action de neutralisation

Expérience : neutralisation de l'acide chlorhydrique par l'hydroxyde de sodium



Réactions d'oxydo-réduction

1. Phénomènes de piles

Expérience : une plaque de cuivre et une de zinc plantées dans un demi citron et une lampe de 1 V entre les plaques. Elle éclaire ce qui est le test de présence d'un courant électrique, donc d'une circulation d'électrons d'une plaque à l'autre. Pour connaître le sens du courant on peut remplacer la lampe par une diode électroluminescente.

On remarquera alors que les électrons vont du zinc vers le cuivre soit le courant du cuivre au zinc.

En répétant des expériences similaires avec d'autres métaux et d'autres électrolytes on peut formuler le résultat : lorsque deux métaux différents sont plongés dans un électrolyte, l'un donne des électrons et l'autre les capte. Il est possible alors d'établir une relation d'ordre entre les métaux selon leur pouvoir de donner des électrons. On aboutit ainsi à l'échelle d'électropositivité des métaux.

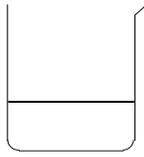
Concepts fondamentaux qui peuvent être abordés

Substance	dans une réaction	effet subit par la substance	Nom de l'électrode où se passe la réaction dans une pile
le réducteur	donne des électrons	une oxydation	anode (électrode -)
l'oxydant	reçoit des électrons	une réduction	cathode (électrode +)

Une oxydation s'accompagne toujours d'une réduction.

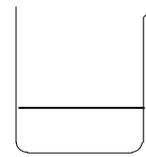
Le couple Redox fonctionne dans un sens et pas dans l'autre.

Expérience



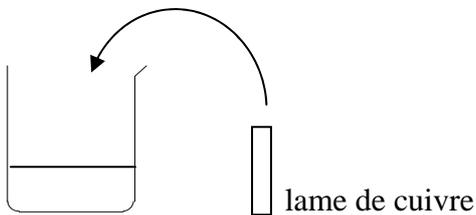
Solution de sulfate
de cuivre à 0,1 mol/L
solution bleue

paille de fer
(tampon Jex)



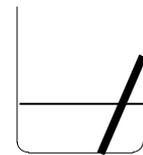
solution verte
dépôt rouge cuivre
sur la paille

Avant



Solution de sulfate
De fer II (solution verte)

Après



rien de changer

Avant

2. Corrosion

Le fer, en présence d'air et d'eau est « attaqué », il y a formation de rouille.

Il convient donc de protéger le fer :

- coques de navires ;
- canalisations en fer ;
- ...

Liste des facteurs de corrosion :

- présence d'impuretés qui créent des micropiles ;
- couples redox oxyde de fer/fer ;
- dissymétrie fer-fer aéré dans de l'eau salée.

Liste des protections :

- fil de zinc, « pain » de zinc ;
- cuivrage, nickelage ;
- peinture et vernis ;
- revêtements plastiques.