



Conceptions d'élèves et d'étudiants français et tunisiens sur la conduction dans les piles électrochimiques

Conceptions of French and Tunisian students on conduction in electrochemical cells

Kamel BOURAOUI, Maurice CHASTRETTE

LIRDHIST
Université Claude Bernard Lyon I
69100 Villeurbanne, France.

Résumé

Cet article présente les conceptions sur la conduction électrique dans les piles électrochimiques repérées chez des élèves et des étudiants français ou tunisiens. Cinquante-cinq lycéens (de 16-17 ans) et soixante-quatre étudiants ont participé à cette étude. La démarche mise en place associe un questionnaire et des entretiens semi-directifs basés sur l'observation de dispositifs expérimentaux.

L'omniprésence des conceptions relatives à la présence des électrons en solution est essentiellement due à l'assimilation du courant électrique à un déplacement d'électrons, même dans les électrolytes. L'absence de liaison entre le mouvement des ions et le courant électrique constitue un obstacle à la construction des concepts nécessaires à la compréhension du fonctionnement des piles électrochimiques. Quelques facteurs de persistance des conceptions repérées sont brièvement analysés.

Mots clés : *conceptions, pile, conduction, courant électrique.*

Abstract

This paper discusses some misconceptions identified in France and Tunisia, relating to the conduction processes in electrochemical cells. Fifty-five secondary school pupils (Grades 11 & 12) and sixty-four university students were tested using a paper and pencil test and interviews, based on the observation of experimental situations. Conceptions related to the presence of electrons in solution are ubiquitous and apparently mainly generated by the conception of an electric current as a movement of electrons, even in electrolytes. Ionic conduction is not considered as generating electric current and ions are seen as passive constituents of solutions. Possible origins of these misconceptions and significant factors contributing to their persistence are discussed.

Keys words : *misconceptions, electrochemical cell, conduction, electric current.*

Resumen

Este artículo presenta las concepciones sobre la conductividad eléctrica en las pilas electroquímicas superadas por los alumnos y estudiantes franceses y Tunecinos. Cincuenta y cinco liceistas (de 16 y 17 años) y sesenta y cuatro estudiantes universitarios han participado en este estudio. El procedimiento utilizado asocia un cuestionario y entrevistas semi-directivas basadas en la observación de la parte experimental. La omnipresencia de las concepciones relativas a la presencia de los electrones en solución, es esencialmente debida a la asimilación de la corriente eléctrica a un desplazamiento de electrones, mismo en la electrólisis. La ausencia de asociación entre el movimiento de los iones y la corriente eléctrica constituye un obstáculo a la construcción de los conceptos necesarios para la comprensión del funcionamiento de las pilas electroquímicas. Algunos factores de persistencia de las concepciones superadas son brevemente analizadas.

Palabras claves : *concepciones, pila, conducción, corriente eléctrica.*

INTRODUCTION

Actuellement, en France et en Tunisie, l'enseignement de l'électrochimie dans le secondaire s'effectue en chimie. Depuis une centaine d'années, cet enseignement a été rattaché alternativement à la physique et à la chimie (Morenas, 1995), sans doute en raison de la position de cette science au carrefour de nombreuses disciplines. Il apparaît que l'apprentissage de l'électrochimie nécessite la maîtrise de notions traditionnellement enseignées d'une part en physique et d'autre part en chimie, comme, entre autres, la conduction du courant électrique, la stœchiométrie et l'oxydoréduction (Sculfort, 1995).

Cette caractéristique semble créer chez les élèves et les étudiants diverses difficultés (Perkins, 1982) qui ont été bien repérées dans de très nombreuses publications (entre autres : Bernard, 1980 ; MacDonald, 1988 ; Al-Soudi, 1989 ; Moran & Gileadi, 1989 ; Runo & Dennis, 1993). Les auteurs de ces articles sont des enseignants conscients des difficultés des élèves face à des problèmes terminologiques comme la distinction entre cathode et anode, pôle positif et pôle négatif, potentiel standard et potentiel d'oxydoréduction ; ils proposent souvent des solutions pratiques en partant de leurs expériences personnelles. Beaucoup remarquent que les aspects qualitatifs des processus électrochimiques restent malheureusement mal compris par les apprenants, malgré leur réussite à des exercices d'évaluation classiques.

Les recherches en didactique sur les conceptions des élèves et des étudiants à propos des phénomènes physico-chimiques dans les piles sont, au contraire, relativement rares. Elles ont été menées essentiellement par deux équipes : Ogude & Bradley en Afrique du Sud (Ogude & Bradley, 1994) et Garnett & Treagust en Australie (Garnett & Treagust, 1992a, 1992b).

Ogude & Bradley ont mis en évidence les conceptions de 30 lycéens et 40 étudiants de 1^{ère} année d'université sur la conduction dans les électrolytes (30 à 40 % de mauvaises réponses) et l'électroneutralité dans une cellule électrochimique (plus de 60 % de mauvaises réponses).

Garnett & Treagust ont identifié, dans une étude menée sur 32 élèves de terminale, 39 conceptions, dont 17 concernent les piles galvaniques et électrolytiques (Garnett & Treagust, 1992a) et 22 les circuits électriques et les réactions d'oxydoréduction (Garnett & Treagust, 1992b). Ces conceptions, relatives aux situations et protocoles mentionnés par ces auteurs (piles, électrolyse, réactions), consistent majoritairement en une interprétation de ces situations en termes d'électrons circulant dans la solution, ce dernier point représentant à lui seul le quart des conceptions identifiées. Selon les auteurs, le résultat le plus significatif de leur recherche est d'avoir identifié de nouvelles conceptions sur la conduction électrique et sur les charges à l'anode et à la cathode.

Notre travail a pour but de répondre à trois questions :

- 1 – *Quelles conceptions peut-on identifier chez les élèves et les étudiants, en France et en Tunisie, en utilisant une technique d'investigation basée sur l'observation de situations expérimentales ?*

Les résultats présentés dans la littérature ont tous été obtenus dans un contexte anglo-saxon, avec une méthodologie fondée essentiellement sur des questionnaires et entretiens généralement basés sur des figures et schémas d'expériences. Nous nous sommes proposés d'approfondir le domaine intéressant, mais peu étudié, des conceptions sur la conduction

électrique dans les piles, en utilisant un autre contexte (français et tunisien) et une autre méthode d'investigation basée sur des situations expérimentales et sur la technique de Prédiction-Observation-Explication de White (1988).

La comparaison des résultats obtenus avec ceux de la littérature devrait permettre de mieux comprendre l'origine de ces conceptions, car celles qui sont retrouvées dans des contextes bien différents et avec des méthodes différentes sont sans doute peu liées au contexte.

2 – Ces conceptions sont-elles engendrées par une ou plusieurs conceptions plus fondamentales ?

Le grand nombre des conceptions repérées par Garnett & Treagust les rend difficiles à exploiter. Compte tenu de leurs similitudes, nous faisons l'hypothèse qu'elles sont en réalité des variantes peu différentes, dérivées de conceptions de fond beaucoup moins nombreuses, que nous chercherons à identifier.

3 – Quels sont les facteurs qui favorisent l'apparition et la persistance de telles conceptions ?

1. ASPECTS THÉORIQUES

L'originalité de la pile électrochimique est, comme le remarquent Cahay et al. (1993), que les conducteurs sont sélectifs : les uns ne laissent passer que les électrons, et les autres ne laissent passer que les ions. Le déplacement des ions dans la solution et dans le pont salin se fait sous l'effet d'un gradient de potentiel, qui assure ce qu'on appelle la migration des ions et par conséquent le courant ionique dans la solution. Bien que l'ensemble des concepts liés à la conduction électrique dans les piles ne soit pas enseigné en tant que tel dans le secondaire (ni en France ni en Tunisie), on ne peut s'en passer pour la compréhension des phénomènes électrochimiques.

Nous considérons qu'un modèle qualitatif simple du fonctionnement des piles et de la conduction permet d'expliquer d'une manière cohérente le déplacement des électrons dans les conducteurs métalliques et le déplacement des ions dans la solution. Dans la pile Daniell (figure 1) ce modèle permet de repérer la cathode (anode) comme l'électrode vers laquelle se dirigent les cations (anions). Il permet de généraliser la définition du sens conventionnel du courant électrique et de confirmer que, dans la solution, les anions (chargés négativement) se déplacent dans le même sens que les électrons hors de la solution.

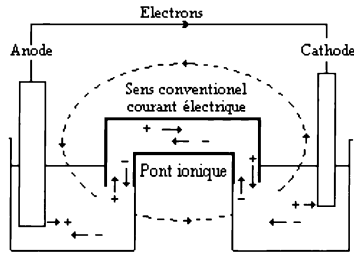


Figure 1 : Migrations des cations (+) et des anions (-)

Le rôle des réactions d'oxydoréduction qui ont lieu aux électrodes, considérées selon Bokris & Reddy (1970) comme des échangeurs de porteurs de charges, permet d'expliquer comment le transport de charges peut persister jusqu'à l'usure de la pile. Les phénomènes complexes qui se déroulent dans la double couche au voisinage des électrodes ne sont pas considérés dans ce modèle qualitatif simple.

Pour nous, dans le cadre de ce travail, un modèle du courant électrique continu dans une pile est acceptable s'il fait intervenir le déplacement des divers porteurs de charges dans la matière (électrons dans le métal et ions dans l'électrolyte) sous l'action d'un gradient de potentiel.

2. MÉTHODES

2.1. Sujets

L'échantillon étudié (tableau 1) comporte cinquante-cinq lycéens (de 16 à 17 ans) et trente et un étudiants en cours de deuxième année d'études après le baccalauréat. Les élèves français sont censés connaître les concepts de l'électrochimie (oxydoréduction et piles) enseignés dans le cadre de leur cours en 1^{ère}S. En Tunisie, le test a été administré aux élèves de classe terminale avant le cours sur les piles, mais l'oxydoréduction fait partie du programme de l'année précédente.

Niveau	Lycée		Université	
	1 ^{ère} Scientifique	Terminale Sciences	DEUG* Chimie Biochimie	PC2* Physique Chimie
Nombre	30	25	13	18
Lieu	Lyon	Tunis	Lyon	Tunis

Tableau 1 : Composition de l'échantillon d'élèves et d'étudiants (* DEUG = Diplôme d'Études Universitaires Générales ; PC = Physique Chimie)

Par ailleurs, nous avons constitué à titre de comparaison un échantillon composé de 33 étudiants de fin de maîtrise de Sciences Physiques (SP4) en Tunisie.

2.2. Méthodes

La méthode utilisée combine un questionnaire et des entretiens semi-structurés basés sur des dispositifs expérimentaux simples utilisant la technique de Prédiction-Observation-Explication (Champagne et al., 1980 ; White, 1988). Une succession de situations touchant à la conduction (dans la solution, le pont salin et le fil électrique) et aux échanges de porteurs de charges au contact métal-solution (environ quatre par conception visée) a été conçue dans le but de mieux mettre en évidence les erreurs récurrentes communes aux réponses données par divers élèves car, selon Brousseau : « *Il s'agit donc d'abord pour les chercheurs de trouver ces erreurs récurrentes, montrer qu'elles se regroupent autour de conceptions ...* » (Brousseau, 1989, p. 42).

Les questions (ouvertes ou à choix multiple) sont posées une à une, selon une chronologie, contrôlée par le chercheur, d'une durée totale d'environ 50 minutes. Les élèves sont placés devant un dispositif expérimental et on leur demande de prédire puis d'observer et enfin d'expliquer un résultat expérimental. Les dix questions portent sur le programme de chimie de l'enseignement secondaire et principalement sur trois thèmes : les réactions d'oxydoréduction au contact métal-solution, la conduction dans les solutions et la pile Daniell (en annexe).

Des entretiens ont été menés avec deux groupes d'élèves de 1^{ère} S. Chaque groupe est composé d'une fille et d'un garçon (E1 à E4) choisis parce que, d'après le dépouillement du questionnaire, ils présentent les diverses catégories de conceptions dominantes sur la conduction dans une pile que nous décrivons plus loin.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats que nous présentons concernent principalement les conceptions sur la conduction électrique dans les solutions aqueuses, le rôle du pont salin dans une pile et le courant électrique en général.

3.1. Analyse des réponses des élèves et des étudiants

3.1.1. Conduction à travers le pont salin

Résultats

Les questions 5, 7, 8 et 9 (en annexe) visent à faire émerger les conceptions des élèves sur le rôle du pont salin dans les piles. L'analyse des réponses à ces questions permet de distinguer trois groupes d'élèves (A, B et C) selon la nature des porteurs de charges qu'ils mentionnent (tableau 2). Par exemple l'ensemble des réponses B à Q5, 4 à Q7 et A à Q9 et d'une réponse libre faisant allusion aux seuls électrons à Q8 caractérisent le groupe A pour lequel les électrons sont les seules charges traversant le pont salin. Un élève est considéré comme appartenant à ce groupe s'il fait deux ou plus de ces quatre choix, car nous supposons qu'un choix unique peut être interprété comme aléatoire et insuffisant pour confirmer son appartenance à ce groupe. On trouve ainsi 11 élèves dans le groupe A, soit 36 % de la classe.

Groupes	Porteurs de charges	Lycée		Université	
		1ère S N = 30	Terminale N = 25	DEUG N = 13	PC2 N = 18
A	Electrons seuls	36 %	40 %	31 %	33 %
B	Electrons et ions	27 %	56 %	31 %	39 %
C	Ions seuls	36 %	4 %	38 %	28 %

Tableau 2 : Nature des porteurs de charges dans le pont salin

Les réponses les plus fréquentes (données par les groupes A et B, soit plus de la moitié des élèves) assimilent le pont salin à un dispositif qui permet le passage des électrons d'un compartiment à un autre. Le pourcentage élevé observé en Tunisie chez les élèves de terminale, qui n'ont pas eu de cours sur les piles, reflète la spontanéité de cette conception, identifiée aussi bien par Ogude & Bradley (1994) que par Garnett & Treagust (1992a, 1992b) et qui persiste jusqu'à la maîtrise (33 % des étudiants en SP4).

Les élèves du groupe C n'ont pas évoqué la présence d'électrons dans le pont salin mais celle des ions. La différence de pourcentage entre les élèves de première S et de terminale reflète l'effet de l'enseignement sur les piles (déjà donné en classe de première à Lyon et pas encore en terminale à Tunis). À l'université, ce groupe représente 28 à 38 % des étudiants en DEUG contre 67 % des étudiants en maîtrise (SP4).

Les élèves des groupes B et C, qui précisent la nature des ions traversant le pont, ont une préférence marquée pour les cations (12 à 30 %, contre 0 à 10 % pour les anions). Les étudiants de DEUG partagent ce point de vue (environ 30 à 40 % pour les cations et seulement 0 à 7 % pour les anions).

Étude des justifications avancées par les élèves

Les extraits d'entretiens présentés ci-dessous illustrent les explications et les principaux arguments avancés par les élèves.

Pour les élèves des groupes A et B, qui admettent la circulation d'électrons dans le pont salin, les principales justifications sont les suivantes :

– **analogie avec le fil électrique** : «[...] *les deux moyens de transport des électrons - mais uniquement d'électrons - sont le fil et le pont* » (E1). Cette analogie semble être due (entre autres) à la présentation du pont salin comme un «conducteur» qui «ferme le circuit électrique» ;

– **passage indispensable** : «*d'ailleurs s'il n'y a pas d'électrons qui passent dans le pont, il n'y a pas d'oxydoréduction* » (E2). Le passage obligé des électrons par le pont est justifié aussi par la nécessité d'assurer les réactions électrochimiques dans les demi-piles. Le mot pont est employé par E2 dans son sens habituel « [...] *le pont c'est comme nous, quand on a envie d'aller de l'autre côté d'une berge, on traverse* » qui diffère du sens qu'on lui donne dans les manuels scolaires ou dans les cours ;

– **mélange interdit** : «[...] *s'il y a des composés de sulfate de magnésium qui passent par le pont, ça va se mélanger avec l'autre solution* » (E3). Cet élève pense que, si les ions circulaient dans le pont salin, les solutions se mélangeraient. Or, le pont est souvent décrit dans certains livres scolaires comme un dispositif qui sépare les deux solutions ou «*empêche le contact entre 2 solutions*» (Cros & Moreau, 1988 ; Durupthy et al., 1988) ce qui renforce la stabilité de la conception selon laquelle le pont salin ne laisse passer que des électrons ;

– **équilibre des charges** : «[...] *il y a passage des électrons d'une solution à une autre [...] ils vont s'équilibrer jusqu'à neutralité des deux solutions [...] Il y a autant d'électrons des deux côtés* » affirme E3. Pour cet élève, la présence des électrons dans la solution est nécessaire pour maintenir la neutralité des électrolytes.

Pour ceux des élèves des groupes B et C qui font circuler dans le pont salin des ions, mais seulement des cations, on repère deux arguments :

– **équation bilan** : «[...] *l'équation bilan a besoin plutôt du Mg, du Cu et des deux solutions [...] donc ce sont bien des ions (Mg²⁺ et Cu²⁺) qui circulent dans le pont* » (E3). Cet élève se base sur une interprétation de

l'équation bilan $Mg + Cu^{2+} \longrightarrow Mg^{2+} + Cu$ où l'ion Cu^{2+} est schématisé du côté de Mg et donc migre vers Mg alors qu'inversement l'ion Mg^{2+} va du côté de Cu, d'où la circulation des seuls cations dans le pont ;

– **anions spectateurs** : « *on n'a jamais tenu compte des réactifs (SO_4^{2-}) qui ne bougent pas [...] si cela ne réagit pas on n'en tient jamais compte* » affirme E3. Une autre conséquence de l'interprétation de l'équation bilan est l'absence des anions dans le mécanisme réactionnel, d'où le rôle de «spectateurs » donné aux charges négatives.

Pour certains élèves du groupe C, la nécessité d'équilibrer en charges les deux électrolytes les incite à faire migrer seulement des anions (parmi les ions) dans le pont salin, comme l'explique l'élève E1:

– **équilibre des charges** : « [...] *il y a trop de charges plus (Mg^{2+}), [...] pour que ce soit de nouveau neutre il faudrait des charges moins qui arrivent, [...] des charges moins de SO_4^{2-} , [...] voilà, le pont sert à les faire passer ...* » (E1).

En résumé, il semble que, pour la majorité des individus interrogés, la conduction dans le pont salin est assurée principalement par des électrons. Pour ceux qui font intervenir des ions, la conduction est assurée préférentiellement par des cations et assez exceptionnellement par des anions. Bien que certaines réponses puissent être conjoncturelles (Clément, 1994), la cohérence des réponses dans des situations suffisamment variées et la comparaison avec les résultats d'autres auteurs suggèrent fortement qu'il existe une conception plus générale et plus profonde concernant la conduction elle-même.

3.1.2. Conduction à travers l'électrolyte

Résultats

Les réponses aux questions 3, 4, 8 et 9, portant sur la conduction à travers l'électrolyte, peuvent être regroupées en trois catégories (tableau 3) selon le processus décrit plus haut.

	Lycée		Université	
	1ère S N = 30	Terminale N = 25	DEUG N = 13	PC2 N = 18
électrons seuls	53 %	36 %	61 %	27 %
électrons transportés	26 %	48 %	7 %	44 %
pas d'électrons	20 %	16 %	31 %	27 %

Tableau 3 : Passage des électrons à travers une solution.

Comme on s'y attend d'après les résultats sur le pont salin, un fort pourcentage des élèves (environ 70 %) fait apparaître des électrons dans l'électrolyte. Cette conception se manifeste en Australie chez 60 % des lycéens testés par Garnett & Treagust (1992a) et aussi en Afrique du Sud, chez 40 % des lycéens et chez 30 % d'étudiants. En contrepartie, seulement 20 à 30 % des réponses ne font pas apparaître d'électrons dans la solution (sauf en SP4 où le taux atteint 60 %).

Nous remarquons une grande cohérence dans les réponses sur la conduction dans le pont et dans la solution. Par exemple, les élèves qui font circuler des électrons dans le pont salin les font généralement (dans 87 % des cas en 1^{ère} S et 100 % des cas en terminale) circuler également dans la solution.

Étude des justifications avancées par les élèves

Quelques extraits d'entretiens permettent de comprendre les arguments avancés pour expliquer comment l'électron traverse la solution et arrive jusqu'au pont salin. Deux modes de déplacement des électrons, libres ou transportés, sont invoqués :

– **électrons libres** : « [...] *ils sont libres vraiment, ils divaguent comme ça* », affirme E2. Pour cet élève, les électrons passent sans aucune contrainte d'une électrode à l'autre, traversent les deux électrolytes et le pont salin puis ferment leur trajet par le circuit externe. Certains élèves ont une approche anthropomorphique et utilisent des expressions de la vie courante comme : « *il bouge* », « *il divague* », « *il nage* » comme « *une personne dans une piscine* » ;

– **électrons transportés** : « [...] *Mg²⁺ le prend (l'électron) en charge jusqu'au pont et l'électron se débrouille tout seul (dans le pont) puisqu'il (le pont salin) est conducteur [...] ensuite Cu²⁺ le prend en charge puis ça donne du cuivre qui se dépose sur la lame de cuivre et l'électron repart sur le fil* » selon E3, qui explique clairement que les cations transportent les électrons pour assurer leur passage à travers la solution. E3 donne au mot « transporter » le sens habituel de porter ou faire passer.

Cette conception se rapproche de celle d'Helmholtz qui, en 1879, représentait les ions comme étant constitués par des atomes matériels qui transportent des atomes électriques (électricité), de même qu'un « *soldat transporte son fusil* » (Oswald, 1912). On remarque que l'idée d'associer le métal et l'électricité persiste encore de nos jours chez les élèves, bien qu'il soit risqué d'établir un parallélisme strict avec l'histoire des sciences.

3.2. Hypothèses sur l'origine des conceptions

Nous avons retrouvé une partie des conceptions repérées par Ogude & Bradley (1994) et Garnett & Treagust (1992). Ces auteurs analysent les conceptions une par une, comme si elles étaient indépendantes. Nous pensons au contraire qu'elles pourraient être des variantes d'un nombre beaucoup plus limité de conceptions plus profondes que nous qualifions de conceptions «mères», pour indiquer qu'elles se trouvent en amont. L'identification d'une telle conception devrait faciliter l'analyse de celles qui en sont dérivées.

Dans notre cas, les réponses obtenues aux deux premiers groupes de questions (sur le pont salin et l'électrolyte) suggèrent qu'une des conceptions mères concerne le modèle électronique du courant. C'est une notion ancienne, bien ancrée dans l'esprit de l'élève, et sur laquelle il peut construire ses nouvelles conceptions en adaptant à ses connaissances antérieures (Astolfi & Develay, 1989) les informations qu'il reçoit. Elle constitue, ainsi, l'instrument auquel l'élève fait appel pour décoder et filtrer les informations nouvelles.

Pour tester cette hypothèse, il est intéressant d'examiner les réponses de nos sujets à l'ensemble des questions 3, 4, 9 et 10 qui portent sur le courant électrique.

La conception la plus répandue (chez 44 à 68 % des élèves et 45 % des étudiants) limite la définition du courant électrique au déplacement des électrons. Ainsi, à la question « *Qu'est-ce qu'un courant électrique dans une solution ?* » l'élève E2 répond : « [...] *obligatoirement des électrons parce que courant égale électrons. Ce ne sont pas des ions Mg qui vont passer dans le pont salin* ». Il ajoute : « *pour moi je pense que [...] les électrons ont pour mission de tenir le courant* ». Manifestement, cet élève généralise la définition du courant électrique dans un conducteur métallique (donnée en classe de physique) et l'applique dans le cas du conducteur ionique. Il n'établit pas de relation entre les porteurs de charges, le conducteur correspondant et la présence d'un champ électrique.

Cette situation est peut-être, entre autres, due à une confusion entre les différentes définitions du courant électrique données dans des ouvrages scolaires. On trouve ainsi, d'une part « *le courant électrique est un flux d'électrons à travers les conducteurs métalliques* » (Bernard et al., 1978), et d'autre part « *le passage du courant électrique dans la pile est assuré par une double migration d'ions* » (Fontaine et al., 1988). Le mot *électrique* lui-même suggère que le courant électrique est dû à un mouvement d'*électrons* quel que soit le conducteur.

Dans une autre conception du courant électrique, manifestée par environ 10 % de l'ensemble des sujets de l'échantillon, le courant dans le pont salin et dans l'électrolyte est défini comme un mouvement de charges positives, le déplacement des anions n'engendrant pas de courant électrique. Cette conception est peut-être liée à l'adoption en physique du sens conventionnel du courant électrique comme étant celui des charges positives (convention faite à une époque où l'électron était inconnu). Ceci incite probablement ces élèves à confondre le flux électronique et le modèle du courant conventionnel. Pour l'éviter, Garnett & Garnett (1990) proposent de définir le sens du courant à partir du flux d'électrons dans un métal.

Ainsi, le concept de courant électrique n'a pas beaucoup évolué depuis son introduction en classe de physique. Les élèves ont adapté le modèle de conduction électronique à la conduction électrolytique, sans que cela ne leur pose apparemment de problème, d'où la construction de plusieurs conceptions greffées sur cette vision du courant électronique. Ceci expliquerait le nombre élevé de réponses dans lesquelles l'électron apparaît dans la solution.

3.3. La conduction vue par l'élève

Il est maintenant possible d'esquisser un portrait d'ensemble qui reprend et met en perspective la plupart des conceptions dominantes telles que nous les avons rencontrées. Partant d'une conception principale qui est le modèle électronique du courant, l'élève est en mesure d'expliquer, à sa manière, la majorité des concepts introduits dans le cours d'électrochimie sur les piles. Selon son raisonnement, les électrons sont libérés par une réaction d'oxydoréduction. Ces électrons suivent toujours le chemin le plus court vers l'autre électrode : « *en fait ils (les électrons) passent par la solution parce que les électrons prennent toujours le chemin le plus court ...* » explique E3.

Dans l'électrolyte, l'électron peut se déplacer de deux manières. Il peut « *nager* » dans la solution comme « *une personne dans une piscine* » ou « *sauter d'un ion à un autre comme sur des pierres pour traverser une rivière* ». Il peut aussi être transporté par un ion et c'est généralement un cation qui s'en charge (attraction électrostatique oblige). Ainsi, l'ion magnésium transporte l'électron de l'électrode de magnésium vers le pont salin. Comme le pont sépare les solutions, l'ion magnésium ne peut plus passer, il lâche son électron dans le pont. Le pont conduit l'électron à l'autre bout où il est récupéré par l'ion cuivre qui le ramène jusqu'à l'électrode de cuivre. Le mouvement de l'électron dans l'électrolyte (conducteur) est dû à l'attraction du pôle positif qui joue le rôle d'un aimant qui aspire les électrons

« *les pôles, les aimants, enfin c'est le pôle opposé, c'est le (+) qui les attire* » (E1) et ainsi, l'électron assure la réduction du cuivre et ferme le circuit électrique.

Ce portrait tracé à grands traits montre que les élèves, lorsqu'ils sont placés dans un ensemble de situations expérimentales variées, utilisent un système cohérent de conceptions pour donner un sens aux phénomènes de conduction dans une cellule électrochimique, Strike & Posner (1983) parlent à ce propos « *d'écologie conceptuelle* ».

4. CHANGEMENT CONCEPTUEL

4.1. Résolution des conflits cognitifs par les élèves

L'un des processus admis pour le changement conceptuel est la restructuration des connaissances liée à la résolution d'un conflit cognitif qui s'établit entre les nouveaux concepts introduits et la structure cognitive existante (Rowell et al., 1990). À ce propos, Johsua & Dupin (1987) parlent de gestion des contradictions que l'élève repère entre l'ancienne connaissance et la nouvelle.

Plusieurs recherches sur le changement conceptuel (Tiberghien, 1986 ; Giordan, 1994) ont montré que les nouvelles connaissances coexistent avec les anciennes mais ne les remplacent pas. L'élève réorganise les informations préexistantes et les informations nouvellement acquises, tout en conservant le même raisonnement.

D'autres chercheurs (Hashweh, 1986) préfèrent expliquer l'assimilation en termes de conceptions résultantes. Nussbaum (1979) a identifié les conceptions formées comme la résultante de notions déjà acquises et des connaissances nouvellement enseignées. Par exemple, la préconception que la Terre est plate » et la notion enseignée « la Terre est ronde », donnent comme résultante la conception que « la Terre est un disque ». Dans le cas de l'électrochimie, la figure 2 montre les hypothèses qu'on pourrait avancer sur les résultats de l'interaction entre les nouvelles notions introduites dans le cours de chimie et les notions acquises antérieurement dans les cours de physique.

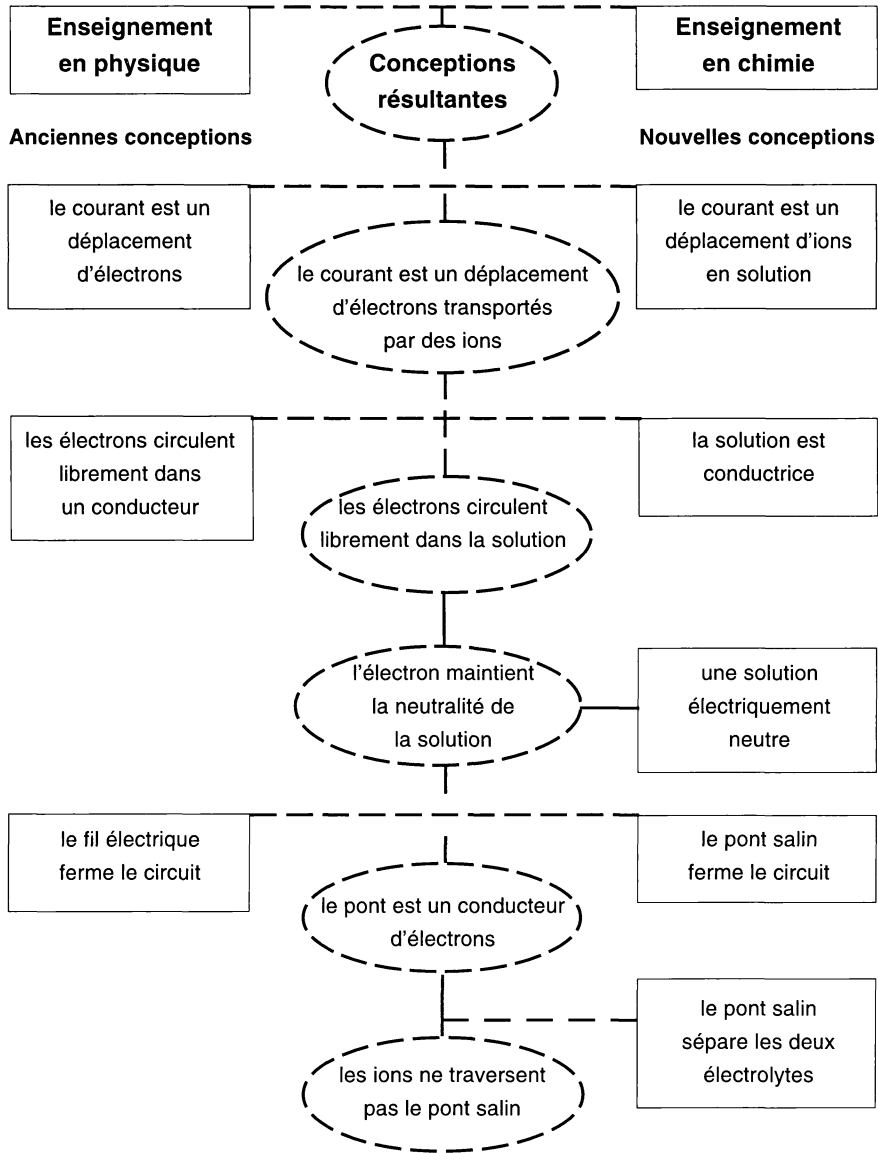


Figure 2 : Interaction entre les conceptions anciennes et nouvelles

Le rôle important des conceptions préexistantes pour la construction des nouvelles pourrait expliquer en partie la résistance au changement conceptuel. En effet, la conception du courant comme déplacement d'électrons, enseignée longuement dans les cours de physique, est

l'instrument principal dont l'élève dispose pour décoder les enseignements ultérieurs sur les piles.

Dans de nombreux cas, les élèves ne semblent pas ressentir un conflit entre le nouveau concept et la structure cognitive existante et n'éprouvent aucun besoin de restructurer leurs connaissances. C'est le cas de ceux qui font circuler librement les électrons dans la solution, en appliquant le modèle « pur et dur » du courant électronique, sans faire de distinction entre un pont salin et un fil électrique.

Lorsqu'il ressent un conflit, l'élève peut réagir en continuant à définir le courant en solution comme un déplacement d'électrons mais en admettant de plus que les électrons sont transportés par des ions, pour tenir compte des nouvelles notions introduites en chimie.

Enfin, dans le cas le plus favorable, le conflit est suffisamment fort pour engendrer une modification importante des conceptions.

4.2. Facteurs de persistance des conceptions

L'omniprésence et la stabilité de la conception relative à la présence d'électrons en solution invitent à s'interroger sur les facteurs qui favorisent sa persistance. Il nous a paru intéressant de tenter de repérer les influences respectives du sens commun et de l'enseignement.

Le langage de tous les jours apparaît, avec son anthropomorphisme, dans la description du déplacement des électrons avec des expressions comme : « *ils nagent* », « *ils bougent* », « *ils divaguent* ». De même pour le mot « pont » dont la signification diffère souvent du sens scientifique du terme. On retrouve l'un des obstacles épistémologiques reconnus par Bachelard (1938).

Les travaux en didactique montrent que plusieurs facteurs, liés aux enseignants (Tasker, 1981), aux pratiques d'évaluation (Anderson & Smith, 1983) et aux manuels scolaires (Garnett & Garnett, 1990) peuvent jouer en faveur de la persistance des conceptions. Anderson & Smith (1983) ont en effet montré que l'acceptation sans critique de réponses approximatives contribue à la persistance de telles croyances, car ce sont les réponses que le professeur accepte et récompense qui définissent ce qui est réellement demandé aux élèves. Certains manuels scolaires contribuent de leur côté à la formation et à la persistance de conceptions erronées (Worthy, 1987). Nous avons entrepris un examen de sept manuels, limité à une analyse des propos des auteurs sur le statut accordé au courant électrique, le rôle des ions dans la conduction électrique et le rôle du pont salin dans le fonctionnement de la pile. Nous rapportons ci-dessous certaines phrases

qui semblent susceptibles de provoquer chez les élèves un raisonnement ou une interprétation erronés. L'introduction du pont salin comme un dispositif qui sert à « *fermer le circuit* » (Moreau & Praud, 1979 ; Cros & Moreau, 1988 ; Durupthy et al., 1988) ou encore à « *empêcher le contact* » (Lahaie et al., 1976 ; Durupthy et al., 1988) entre deux solutions pourrait entraîner chez quelques élèves une généralisation abusive.

Des phrases comme « *des électrons quittent le zinc et se dirigent vers le cuivre* » (Mesplède et al., 1994), sans précision sur le chemin suivi, peuvent renforcer l'idée que le courant est uniquement un déplacement d'électrons.

Enfin, le statut ambigu du pont salin dans les livres scolaires n'est pas surprenant, car la complexité des notions de cinétique et de thermodynamique chimique nécessaires pour expliquer scientifiquement ce qui se passe dans le pont constitue un obstacle. Parmi les dix livres du secondaire datant de 1976 à 1996 qui ont été analysés, seulement un sur deux présente un schéma explicatif de la migration des ions dans le pont et un seul (Fontaine et al., 1988) donne une interprétation scientifique convenable. Cette interprétation du pont salin n'a malheureusement pas, à l'heure actuelle, dans les programmes officiels français et tunisien, la place qu'elle mérite.

Dans un entretien, l'élève E3 reconnaît que l'introduction simplifiée de la notion de pont l'a empêché de comprendre la pile : « *Ce qui me manquait, c'est de savoir la fonction précise du pont* ». De même pour E4 : « *je ne savais pas comment il (le pont) est fait, puis je ne savais pas si c'étaient les ions K^+ et NO_3^- qui compensaient le manque, quoi[...] je croyais qu'ils (les électrons) tournaient en rond* ».

Ces extraits montrent que, contrairement à l'objectif pédagogique visé par les programmes (faciliter la compréhension de la pile Daniell), la présentation du pont salin crée chez les élèves des problèmes conceptuels accentués par l'introduction ambiguë de ce dispositif dans certains manuels scolaires : « [...] *quand on nous dit on met le pont et ça marche, pour nous [...] la première réaction c'est que les électrons passent* » conclut E3.

CONCLUSION

L'analyse des réponses au questionnaire et aux entretiens nous a permis d'avoir une vision globale des conceptions des élèves et des étudiants. Les conceptions que nous avons repérées en France et en Tunisie recourent bien celles qu'avaient signalées les chercheurs d'Afrique du Sud et d'Australie, en dépit de la différence des contextes scolaires et culturels. Les variations des pourcentages d'un pays à l'autre n'ont pas été

interprétées, compte tenu de la taille des échantillons et de l'aspect qualitatif de notre étude.

Les entretiens et les questionnaires fondés sur la technique de Prédiction-Observation-Explication ont constitué un outil simple et satisfaisant pour confronter les conceptions des élèves à l'expérience, dans des situations variées. Des expériences simples tirées de notre travail seraient facilement utilisables en classe pour initier des débats sur les conceptions des élèves.

Les conceptions relatives au déplacement d'électrons dans les solutions ioniques sont nombreuses et résistantes, comme le montre l'étude de leur évolution depuis l'enseignement secondaire jusqu'à l'université. Nous admettons que ceci découle directement, au moins en partie, de la définition, donnée antérieurement, du courant électrique dans un conducteur métallique. Ce modèle est tellement bien ancré dans l'esprit des élèves qu'on peut le considérer comme une conception fondamentale que les élèves font fonctionner pour décoder et filtrer les nouvelles informations qu'ils reçoivent sur les piles. L'usage très fréquent de ce modèle électronique qui devient automatique et inconscient lui confère le statut d'une connaissance procédurale (Hashweh, 1986). L'identification d'une telle conception facilite l'analyse et l'exploitation d'un grand nombre de réponses selon lesquelles l'électron constitue la charge essentielle assurant la conduction électrique dans une pile.

L'absence du concept de courant ionique se fait sentir fortement, puisqu'elle exclut une éventuelle mise en relation entre le courant électrique et le mouvement des ions au sein de la solution sous l'effet d'un champ électrique. Ce concept n'est presque jamais mobilisé dans les réponses des élèves et les ions sont vus comme des spectateurs passifs qui, dans les meilleurs des cas, se déplacent pour maintenir l'équilibre des charges ou des masses dans la solution.

À cause de la prégnance du modèle électronique du courant et de l'absence d'un modèle ionique, l'introduction des conducteurs ioniques n'a pratiquement pas perturbé le fonctionnement du modèle de conduction. Ayant du mal à admettre que le double déplacement des ions en solution constitue aussi un courant électrique et qu'un changement de porteurs de charges s'opère au niveau des électrodes, de nombreux élèves ont réussi à interpréter les expériences nouvelles en conservant le seul modèle dont ils disposent, c'est-à-dire le modèle électronique du courant. Ainsi, le concept de courant électrique n'a pas beaucoup évolué depuis son introduction en classe de physique au collège.

La persistance *a priori* surprenante des conceptions chez des élèves et même chez des étudiants pourrait être due en partie à la nature

progressive du changement conceptuel. L'ordre chronologique d'enseignement des différentes notions, les imprécisions sur les limites des modèles relatifs au courant et les ambiguïtés sur le rôle du pont salin présentes dans certains manuels scolaires ne font que renforcer les conceptions dont l'élève dispose avant l'introduction du courant ionique en chimie.

Il serait certes illusoire de penser que nous disposons d'un catalogue exhaustif des conceptions et de leurs origines mais notre travail a mis en évidence la conception dominante qui est à l'origine de la prolifération et de la persistance de conceptions dérivées.

Des travaux en cours portent d'une part sur le rôle des conceptions relatives à la nature des solutions ioniques et plus particulièrement au déplacement des ions, qui peuvent aussi constituer des obstacles à la compréhension de l'électrochimie des piles et d'autre part sur la mise au point d'une séquence d'enseignement fondée sur nos résultats.

BIBLIOGRAPHIE

- AL-SOUDI H. (1989). Confusion over electrochemical conventions. *Journal of Chemical Education*, n° 66, p. 630.
- ANDERSON C. W. & SMITH E. L. (1983). Children's preconceptions and content-area textbooks. In G. Duffy, L. Roehler & J. Mason (Éds), *Comprehension instruction Perspectives and suggestions*. New York, Longman, pp. 216-245.
- ASTOLFI J.-P. & DEVELAY M. (1989). *La didactique des sciences*. Paris, PUF.
- BACHELARD G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris, Vrin.
- BERNARD M., SAISON A., AVOND G., BRUNET J & LE BAIL H. (1978). *Chimie 2° ACT*. Paris, Nathan.
- BERNARD M. (1980). Remarques sur les conventions en électrochimie. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 625, pp. 1197-1200.
- BOCKRIS J.O'M. & REDDY A.K.N. (1970). *Modern Electrochemistry*. London, MacDonald.
- BROUSSEAU G. (1989). Les obstacles épistémologiques et la didactique des mathématiques. In N. Bednarz & C. Garnier (Éds), *Construction des Savoirs*. Ottawa, agence d'ARC, pp. 41-63.
- CAHAY R., HUBIN R. & LINARD R. (1993). *Piles et accumulateurs*. Liège, Éditions du Perron.
- CHAMPAGNE A., KLOPFER L.E. & ANDERSON J.H. (1980). Factors influencing the learning of classical mechanics. *American Journal of Physics*, n° 48, pp. 1074-1079.
- CLEMENT P. (1994). Représentations, conceptions, connaissances. In A. Giordan, Y. Girault & P. Clément (Éds), *Conceptions et connaissances*. Berne, Peter Lang, pp. 15-45.
- CROS A & MOREAU C. (1988). *Chimie 1^{re}SE*. Paris, Belin.
- DURUPHTY A., DURUPHTY O, JAUBERT A. & BAUTRANT R. (1988). *Chimie 1^{re}SE*. Paris, Hachette.
- FONTAINE G., GILLES F., GILLES A. & TOMASINO A. (1988). *Chimie 1^{re}SE*. Paris, Nathan.
- GARNETT P. J. & GARNETT P. J. (1990). Implications of research on students' understanding

- of electrochemistry for improving science curricula and classroom practice. *International Journal of Science Education*, vol. 12, n° 2, pp. 147-156.
- GARNETT P. J. & TREAGUST D. F. (1992a). Conceptual Difficulties Experienced by Senior High School Students of Electrochemistry : Electric Circuits and Oxidation-Reduction Equation. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 29, n° 2, pp. 121-142.
- GARNETT P. J. & TREAGUST D. F. (1992b). Conceptual Difficulties Experienced by Senior High School Students of Electrochemistry : Electrochemical (Galvanic) and Electrolytic Cells. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 29, n° 10, pp. 1079-1099.
- GIORDANA. (1994). Le modèle allostérique et les théories contemporaines sur l'apprentissage. In A. Giordan, Y. Girault & P. Clément, *Conceptions et connaissances*. Berne, Peter Lang, pp. 289-315.
- HASHWEH M.Z. (1986). Toward an explanation of conceptual change. *International Journal of Science Education*, vol. 68, n° 3, pp. 229-249.
- JOHSUA S. & DUPIN J.-J. (1987). La gestion des contradictions dans des processus de modélisation en physique, en situation de classe. *Actes du colloque de Sèvres, Recherche en Didactique des Mathématiques*, mai, pp. 185-199.
- LAHAIE R., PAPIILLON L. & VALIQUETTE P. (1976). *Éléments de chimie expérimentale*. Québec, Bréal.
- MACDONALD J.J. (1988). Cathodes, terminals and signs. *Education in Chemistry*, n° 1, pp. 52-54.
- MORAN P.J. & GILEADI E. (1989). Alleviating the common confusion caused by polarity in electrochemistry. *Journal of Chemical Education*, vol. 66, n° 11, pp. 912-916.
- MOREAU C. & PRAUD B.-L. (1979). *Initiation à la chimie moderne, 1^{re} CDE*. Paris, Belin.
- MORENAS M.-C. (1995). *Électro-Chimie ou Électrochimie ?* Mémoire de DEA de Didactique des Sciences. Lyon, Université Claude Bernard-Lyon 1.
- NUSSBAUM J. (1979). Children's conception of the earth as cosmic body : A cross age study. *Science Education*, vol. 63, pp. 83-93.
- OGUDE A.N. & BRADLEY J.D. (1994). Ionic conduction and electrical neutrality in operating electrochemical cells. *Journal of Chemical Education*, vol. 71, n° 1, pp. 29-34.
- OSTWALD W. (1912). *L'évolution de l'électrochimie*. Paris, Alcan.
- PERKINS R.I. (1982). Electrochemistry. *Journal of Chemical Education*, vol. 62, n° 11, pp. 1018-1019.
- ROWELL A., DAWSON C.J. & LYNDON H. (1990). Changing misconceptions : A challenge to science educators. *International Journal of Science Education*, vol. 12, n° 2, pp. 167-175.
- RUNO J.R. & DENNIS G.P. (1993). Climbing a Potential Ladder to Understanding Concepts in Electrochemistry. *Journal of Chemical Education*, vol. 70, n° 9, pp. 708-713.
- SCULFORT J.-L. (1995). Plaidoyer pour une meilleure prise en compte de l'électrochimie dans les cursus universitaires. *L'actualité chimique*, mars, pp. 35-38.
- STRIKE K.A. & POSNER G.J. (1983). *Understanding from a conceptual change point of view*. Paper presented at the annual meeting of the American Educational Research Association. Montreal.
- TASKER R. (1981). Children's views and classroom experiences. *The Australian Science Teachers Journal*, vol. 27, n° 3, pp. 33-37.
- TIBERGHEN A. (1986). Difficulties in concept formation. In D. Layton (Éds), *Innovations in sciences and technology education*. Paris, UNESCO, pp. 95-108.
- WHITE R.T. (1988). *Learning science*. Oxford, Blackwell.
- WORTHY W. (1987). Reasons for chemistry textbook errors probed. *Chemical & engineering News*, n° 6, p. 62.

ANNEXE

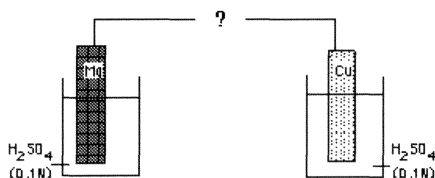
Questionnaire

Les questions 1, 2 et 6, portant sur les réactions d'oxydoréduction qui n'ont pas été discutées dans cet article, ne sont pas présentées dans ce tableau.

Protocole expérimental

Le chercheur plonge une lame de magnésium et une autre de cuivre dans l'acide dilué (HCl) et montre aux élèves un dégagement gazeux sur le magnésium et rien sur le cuivre. Il connecte les lames par un fil métallique à un ampèremètre. Ce dernier indiquera un passage de courant dans le circuit

Maintenant le chercheur place le cuivre et le magnésium dans 2 béchers différents, contenant chacun la même solution d'acide diluée. Avant de relier les deux métaux par un fil conducteur, il leur demande si on peut prévoir un passage de courant dans le fil.



Pour rétablir le contact entre les deux béchers, le chercheur propose différents types de ponts conducteurs.

Questions

Question 3

D'après vous, la conduction électrique à **travers la solution** se fait grâce aux mouvements :

- A – d'électrons transportés par les ions de la solution
- B – d'électrons et d'ions positifs seulement,
- C – d'ions négatifs et d'ions positifs seulement,
- D – d'électrons libres dans la solution,
- E – d'ions positifs seulement,
- F – d'ions négatifs seulement.

Expliquez votre choix.

Question 4

D'après vous, le courant passera-t-il ?

OUI le courant passera car :

- A – les électrons passent par le fil électrique
- B – le contact entre ions n'est pas indispensable pour faire passer le courant
- C – la réaction continue à se produire
- D – autres explications : Laquelle ?

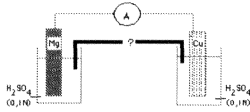
NON le courant ne passera pas car :

- A – les électrons ne passent plus directement vers l'autre lame
- B – il n'y a plus d'échange d'ions
- C – il n'y a plus de retour d'électrons
- D – autres explications : Laquelle ?

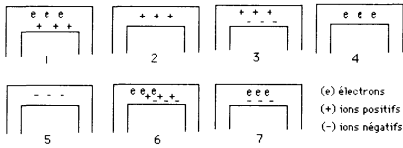
Justifiez votre choix (Vous pouvez faire un OU plusieurs choix)

Question 5 : lequel est celui qui permet de faire passer le courant électrique d'un bécher à l'autre ?

- A – pont conducteur d'ions (ne laisse pas passer les électrons),
- B – pont conducteur d'électrons (ne laisse pas passer les ions),



Le chercheur demande d'identifier les particules chargées présentes dans le pont salin



Le chercheur demande d'identifier les particules chargées présentes dans la pile et d'indiquer par une flèche le sens de leur mouvement quand la pile débite du courant.

- C – pont conducteur qui laisse passer des ions et des électrons,
- D – pont conducteur qui laisse passer seulement les ions positifs,
- E – pont conducteur qui laisse passer seulement les ions négatifs,
- F – autre réponse, laquelle ?

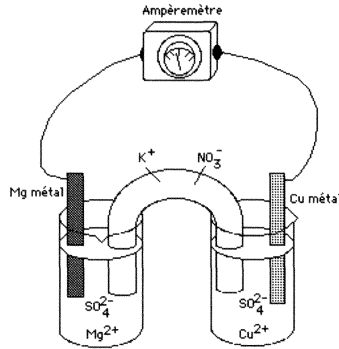
Expliquez votre choix

Question 7

D'après vous quelle est la figure qui représente le mieux la nature des particules chargées qui se trouvent dans le pont salin quand la pile débite du courant ?

Justifiez votre choix .

Question 8 Indiquez le sens de déplacement des ions et des électrons présents dans tout le circuit.



Le chercheur demande aux élèves de prédire si la pile va continuer à débite du courant si on enlève le pont salin.

Question 9

la pile va-t-elle continuer à débite du courant si on enlève le pont salin ?

- OUI** la pile débitera encore un courant car
- A – l'important est le passage des électrons par le fil
- B – la réaction d'oxydation continue à se produire seule
- C – la réaction de réduction continue à se produire seule
- D – autre raison. Laquelle ?

- NON** la pile ne débitera plus de courant car
- A** – les électrons ne peuvent plus passer par le pont
 - B** – les ions ne peuvent plus passer par le pont
 - C** – les ions ne peuvent plus échanger leurs électrons près du pont
 - D** – autre raison. Laquelle ?
Justifiez votre choix (Vous pouvez faire un ou plusieurs choix)

La dernière question proposée est une série d'items vrai/faux

Question 10

Pour chacune des questions suivantes entourez la lettre V ou la lettre F selon que la réponse proposée vous paraît vraie ou fausse.

- A** – « Les ions sont des porteurs de charges »
c'est à dire les ions transportent les électrons lors du passage du courant dans la solution.
V/F
- B** – « Le pont salin empêche le mélange des deux solutions » c'est à dire les ions de la solution ne doivent pas le traverser, seul les électrons passent.
V/F
- C** – « Les anions ne participent pas aux réactions d'oxydoréduction » c'est à dire les anions en solution n'ont rien à voir avec le courant électrique.
V/F
- D** – Le courant électrique ne peut pas être un déplacement d'ions dans une solution **V/F**
- E** – Le courant électrique est toujours un déplacement d'électrons quel que soit le conducteur **V/F**