

LE JEU DES RÉSTISTORS : UNE SITUATION VISANT À ÉBRANLER DES OBSTACLES ÉPISTÉMOLOGIQUES EN ÉLECTRODINAMIQUE

Guy Robardet

Nous présentons ici une recherche en cours dont nous donnons les premiers résultats. Elle concerne l'introduction de l'électrocinétique avec des élèves de collège ou de lycée. L'objectif de ce travail est d'amener les élèves à comprendre qu'un circuit électrique fonctionne comme un système complexe dans lequel tous les composants sont en interaction et, qu'en particulier, l'intensité du courant dans la branche du générateur ne dépend pas seulement des caractéristiques de celui-ci mais aussi de celles des récepteurs et de la façon dont ils sont montés dans le circuit. Il s'agit ici de tenter d'ébranler les principales conceptions des élèves relatives au courant électrique qui ont été bien étudiées en didactique de la physique et qui sont susceptibles de s'ériger en obstacles épistémologiques puissants dans ce domaine de la physique. Le dispositif d'enseignement expérimenté ici fait largement appel à la théorie des situations élaborée par Brousseau dans l'enseignement des mathématiques et à la modélisation.

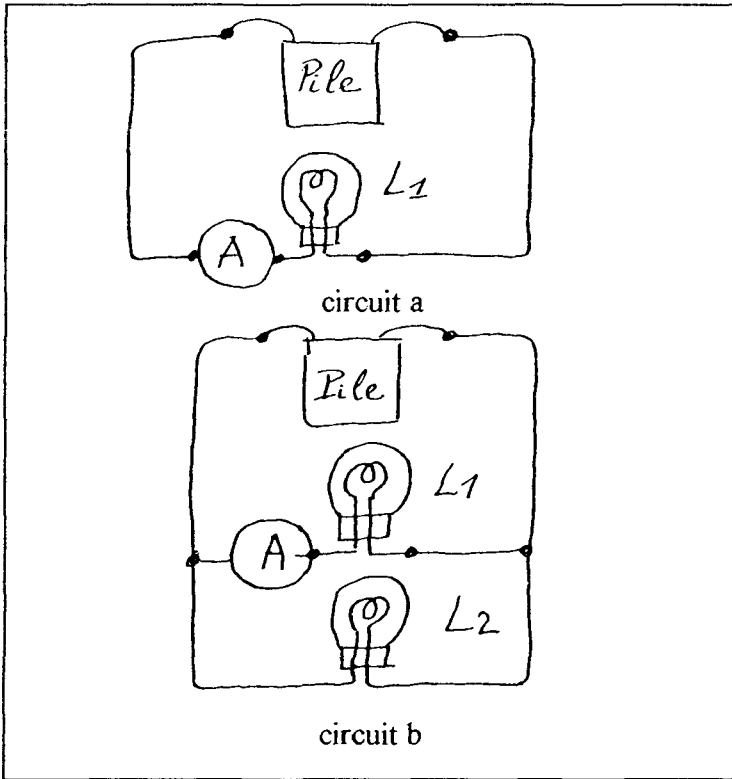
Nous présentons ici un travail qui concerne l'introduction de l'électrocinétique avec des élèves de collège ou de lycée. L'objectif de celui-ci est d'amener les élèves à comprendre qu'un circuit électrique fonctionne comme un système complexe dans lequel tous les composants sont en interaction et, qu'en particulier, l'intensité du courant dans la branche du générateur ne dépend pas seulement des caractéristiques de celui-ci mais aussi de celles des récepteurs et de la façon dont ils sont montés dans le circuit. Ce faisant, il s'agit ici de tenter d'ébranler les principales conceptions des élèves relatives au courant électrique qui ont été bien étudiées en didactique de la physique et qui sont susceptibles de s'ériger en obstacles épistémologiques puissants dans ce domaine de la physique.

1. EN QUOI CONSISTENT LES OBSTACLES AUXQUELS NOUS NOUS SOMMES ATTAQUÉS ?

Quelques exemples d'erreurs, parmi beaucoup d'autres, nous permettront de mieux comprendre en quoi consistent ces conceptions et en quoi elles font obstacle à la construc-

tion du savoir. On a demandé à des élèves d'une classe de seconde de lycée de résoudre l'exercice suivant.

Dans le circuit a, représenté ci-dessous, l'ampèremètre indique une intensité de 100 mA. On monte alors une deuxième lampe identique à la première selon le circuit b. Quel est l'ordre de grandeur de l'indication alors fournie par l'ampèremètre ?



des erreurs
qui ne sont pas
le fait du hasard...

À cette question, 27 des élèves interrogés répondent de manière erronée que l'intensité vaut alors 50 mA, et 8 seulement donnent la réponse correcte, à savoir que l'indication de l'ampèremètre reste voisine de 100 mA.

Voici, à titre d'exemple, quelques explications données par les premiers :

"L'intensité se partage entre les deux branches. Comme L1 et L2 sont identiques, l'intensité va se partager en deux."

"L1 ne reçoit qu'une partie de l'intensité alors qu'avant elle recevait la totalité."

"50 mA : c'est la loi des nœuds."

"L'ampèremètre va afficher 50 mA car il y a un nœud et le courant se divise en deux."

Ces erreurs ne sont pas accidentelles mais résultent d'un raisonnement défectueux. Pour ces élèves, la cause du courant dans le circuit est la pile. Puisque la modification du circuit ne concerne pas cette dernière, elle continuera à fournir toujours le même courant d'intensité 100 mA qui se partagera dans les deux lampes en deux courants de 50 mA. Cette conception dite "du générateur à courant constant" a été étudiée par Johsua et Dupin qui soulignent sa pertinence pour aborder une large classe de problèmes : "La représentation "à débit constant" est parfaitement efficace dans l'analyse d'un circuit pris en tant que tel puisque toutes les grandeurs y sont stationnaires (y compris donc le courant délivré par la pile). Or ceci représente la très grande majorité des problèmes proposés aux élèves." (Johsua & Dupin, 1989).

... qui révèlent
des conceptions
et des modes
de raisonnement...

Autre exemple, lors d'un stage de formation à la construction de montages électroniques destiné à de futurs enseignants de technologie de collège, nous avons remarqué que ces derniers protégeaient les diodes qu'ils montaient en leur associant une résistance en série qu'ils plaçaient systématiquement à l'entrée de la diode. À notre question de savoir pourquoi ils ne la montaient pas, par exemple, à la sortie, plusieurs d'entre eux firent preuve à notre égard d'une sorte de doute concernant nos connaissances en électricité : puisque la résistance sert à protéger la diode à quoi bon la monter à la sortie de celle-ci ? "Si la diode est montée avant, elle reçoit tout le courant et elle claque". Manifestement, dans l'esprit de ces derniers, le rôle de la résistance était, en quelque sorte, d'absorber un trop plein de courant pour ne laisser à la diode montée derrière que ce qui lui était nécessaire. "La résistance c'est comme un bouclier ; si on ne la met pas devant elle ne sert à rien." Ce dernier exemple illustre bien les difficultés rencontrées dans l'enseignement de l'électrocinétique avec le concept de conservation de l'électricité, concept qui heurte la conception profondément enracinée selon laquelle le courant s'affaiblit en traversant les récepteurs du circuit. Closset (1989) a bien étudié cette conception toujours présente chez la majorité des élèves de l'enseignement secondaire qu'il a interrogés. Il cite, à ce sujet le dialogue suivant.

Élève : "Je suppose que les électrons possèdent en eux une force qui est capable de faire de la lumière (dans une lampe). Si ici (une borne de la pile) il y a un débit de 10000 électrons par seconde, là (l'autre borne) il n'en revient peut-être que 9000."

Question : "Et les autres où sont-ils passés ?"

Élève : "Ils sont devenus de l'énergie... ils ne sont plus des électrons."

...susceptibles
de s'ériger
en obstacles
épistémologiques...

Les recherches en didactique des sciences physiques ont montré que ces conceptions largement présentes chez les élèves et les étudiants étaient susceptibles de s'ériger en obstacles épistémologiques vis-à-vis du modèle canonique

de l'électrocinétique qu'il s'agit d'enseigner. Deux raisons au moins permettent d'expliquer ce caractère d'obstacle.

... en raison
de leur
pertinence...

La première tient à la pertinence de ces conceptions et à leur simplicité pour interpréter les phénomènes de la vie quotidienne : lorsqu'une pile alimente une lampe, il y a quelque chose qui s'use ; chacun sait qu'il faudra bien un jour changer la pile. Pour l'élève, ce qui s'use ne peut être que le "courant" ainsi, pour lui, à la sortie de la lampe ou bien il y a moins de charges ou bien elles vont moins vite. On voit bien que, mise en concurrence avec le modèle enseigné qui ne peut rendre compte du phénomène qu'au prix d'une distinction entre les notions d'intensité, d'énergie et de potentiel, la conception est bien plus économique.

La seconde raison concerne le raisonnement sur lequel se structurent ces conceptions. Il contient, en effet, les principaux ingrédients du *raisonnement naturel* de sens commun tel que le décrit Viennot (1996). En premier lieu, il privilégie la causalité linéaire sur le raisonnement systémique qui devrait prévaloir ici. Le recours à cette structure logique particulièrement simple lui donne l'apparence de l'exactitude (le générateur est le responsable du courant ; si on ne change pas le générateur, alors il n'y a pas de modification de l'intensité. Une lampe consomme du courant ; il y en a donc moins à la sortie qu'à l'entrée). En second lieu, il est fréquemment séquentialisé dans le temps en s'appuyant sur l'idée d'un objet (ici le courant) à propos duquel les événements considérés sont présentés comme successifs : le courant sort du générateur, puis arrive à la première lampe qu'il traverse, il parvient ensuite à la lampe suivante etc. avant de retourner dans le générateur. Des phénomènes que la physique considère comme concomitants sont, à tort, interprétés en terme d'histoire et inscrits dans le temps : le courant part à l'aventure dans le circuit et en cours de route il lui arrive des choses. Ce type de raisonnement naturel, qualifié de *séquentiel* a été étudié par Closset (1983) en électricité. En troisième lieu, il procède par "*réduction fonctionnelle*" (Viennot, 1996) ce qui signifie que, alors que la physique interprète un phénomène au moyen de plusieurs grandeurs variant simultanément, la tendance est de n'en considérer qu'une seule à la fois ou d'en confondre plusieurs. Ici les variables du modèle canonique sont l'intensité, le potentiel et l'énergie alors que les élèves raisonnent avec une seule grandeur, pas toujours très bien définie, qu'ils appellent "*le courant*".

... et de leur
caractère
économique

La pertinence apparente des explications données et les économies effectuées au niveau du raisonnement utilisé spontanément par les élèves sont très certainement responsables de la constitution de ces conceptions en obstacles épistémologiques. Ce sont ces obstacles qu'il s'agit de dépasser comme le soulignent Johsua et Dupin : "*La difficulté de l'entreprise doit se comprendre au regard de l'efficacité relative de ce "sens commun" puisque, après tout, ce sont bien les*

schèmes qui lui sont liés qui permettent à tout un chacun de se mouvoir et d'agir sur les objets de la vie quotidienne. Alors que d'un autre côté, les problèmes scientifiques sont des problèmes rares, au sens qu'il est rare de les trouver sous une forme adéquate dans la vie quotidienne. [...] On trouve donc d'un côté les conceptions et modes de raisonnement anciens et bien ancrés, parfois bien adaptés à la très grande majorité des situations de la vie courante ; de l'autre des savoirs plus techniques, exigeant parfois une rupture conséquente avec le sens commun, en vue de traiter des problèmes paraissant un peu spéciaux. La partie est inégale et appelle, pour être gagnée, fut-ce en partie, des stratégies didactiques fort particulières." (Johsua et Dupin, 1993, p.133)

2. QUELLES SONT LES IDÉES DIRECTRICES QUI FONDENT LA STRATÉGIE QUE NOUS AVONS ADOPTÉE ?

L'objectif de notre recherche a donc consisté à prendre en compte les conceptions et modes de raisonnement relatifs à l'électrocinétique décrits précédemment et à construire un dispositif d'enseignement destiné à les mettre en difficulté. Les idées directrices auxquelles nous nous sommes référés ont été les suivantes : l'intensité du courant fourni par le générateur dépend aussi du reste du circuit ; le courant assure la transmission de l'énergie du générateur vers les récepteurs mais le courant et l'énergie doivent être distingués.

Pour construire ce dispositif d'enseignement, nous nous sommes appuyés sur un modèle interactionniste d'apprentissage de type piagétien selon lequel le sujet apprend en s'adaptant à un milieu suivant le double processus d'assimilation-accommodation. Pour cela nous nous sommes fortement inspirés des travaux de Guy Brousseau relatifs à la notion de situation "a-didactique" en mathématiques (Brousseau, 1986). Cet auteur caractérise une telle situation par la nature des interactions, relatives à un savoir donné, qui relie l'élève, le milieu et l'enseignant. Comme nous allons le voir par la suite, ici l'élève modifie son rapport au savoir en construisant ses connaissances comme réponses aux exigences du milieu (et non au désir de l'enseignant). Le milieu, à la fois générateur de sens vis-à-vis du savoir en jeu et producteur d'un système de contraintes qui conditionnent le fonctionnement de la connaissance, rétroagit sur l'élève en termes de sanction positive ou négative à son action et contribue ainsi fortement à la validation des connaissances. Le rôle de l'enseignant consiste tout d'abord à construire et à organiser le milieu par contextualisation du savoir en jeu afin de produire sur l'élève les effets attendus. Dans ce but, l'enseignant délègue à l'élève et lui fait

une situation où l'élève répond aux exigences du milieu...

... qui rétroagit sur l'élève

accepter la responsabilité de la situation d'apprentissage. Ce processus de transfert de responsabilité qui conditionne le fonctionnement "a-didactique" de la situation est qualifié par Brousseau de "dévolution". Ce n'est qu'ensuite que l'enseignant transformera, avec les élèves, les connaissances construites par eux en savoir dans une phase qualifiée d'"institutionnalisation" (Brousseau, 1988). Nous reviendrons sur l'étude de ces caractères dans l'analyse de nos résultats. Il nous faut, auparavant présenter le dispositif d'enseignement que nous avons élaboré.

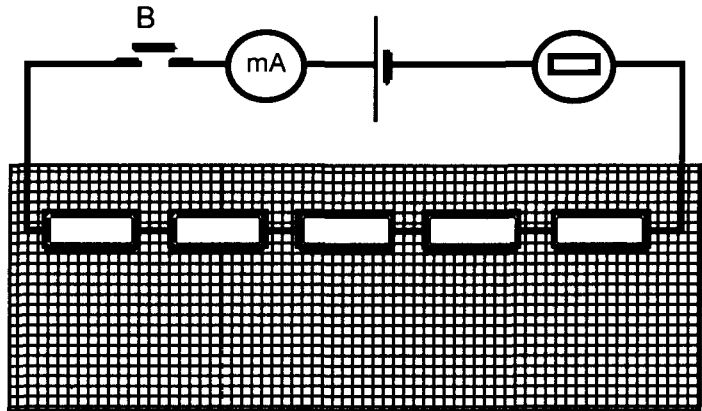
3. LE DISPOSITIF D'ENSEIGNEMENT : LE JEU DES RÉSISTORS

La situation fondamentale autour de laquelle s'articulent les différentes phases de l'enseignement consiste en un jeu qui, au départ, se joue à deux joueurs. Il utilise un matériel constitué par une plaque de connexions sur laquelle peuvent être branchées de toutes les façons possibles au maximum cinq résistances identiques. Cette plaque est montée dans le circuit, représenté ci-dessous, en série avec une alimentation de tension, un milliampèremètre numérique un bouton poussoir et une lampe à incandescence.

le jeu
des résistors :
un dispositif visant
l'apprentissage
par adaptation
à une situation

3.1. Règles du jeu

Le but du jeu est de marquer des points contre l'adversaire en modifiant le nombre et/ou la disposition des résistors sur la plaque de manière à augmenter la valeur affichée sur l'écran du milliampèremètre. Toute action sur le générateur ou sur les autres éléments du circuit est interdite.



Il n'est pas nécessaire que tous les résistors soient montés dans le circuit, mais tous ceux qui le sont doivent être parcourus par un courant. Toutes les associations de résistors

but du jeu :
augmenter
la valeur
indiquée par le
milliampèremètre

(en série, en parallèle ou mixtes...) sont autorisées. Les modifications doivent être effectuées sans appuyer sur le bouton poussoir B : celui qui joue modifie le circuit en montant sur la plaque les résistors comme il l'entend puis il établit le passage du courant en appuyant sur le bouton B. Le joueur dispose pour cela d'une minute. Passé ce délai, il doit céder la place à son concurrent. On ne peut procéder par essais et erreurs. Chaque coup compte. On n'a pas le droit de prendre des notes pendant le jeu. Chaque modification doit être réalisée en vue d'obtenir une augmentation de la valeur indiquée par le milliampèremètre. Si celle-ci se produit, le joueur marque un point et continue. Si, au contraire, la valeur affichée diminue, le joueur cède la place à son concurrent : les étapes faisant l'accord des deux joueurs sont alors comptabilisées au bénéfice de ce dernier qui reprend le jeu au niveau de l'étape litigieuse. En cas de désaccord total, les cinq résistors sont replacés dans leur position initiale (voir figure) et le jeu est repris au début. On joue en temps limité : 30 minutes. Celui qui a gagné est celui qui a réussi à marquer le plus de points sans céder sa place.

3.2. Déroulement du jeu

Le jeu se déroule pendant deux heures au cours de la première séance de travaux pratiques consacrée à l'électrocinétique. Il comporte cinq phases.

- **Phase 1 (action) 30 minutes**

Les élèves jouent par deux l'un contre l'autre pendant trente minutes selon les règles précédentes. Celui qui joue agit sous le contrôle de l'autre (respect des règles).

- **Phase 2 (formulation) 30 minutes**

La classe est divisée en équipes de quatre à six élèves qui jouent les unes contre les autres. Les membres de chaque équipe se concertent afin de rechercher la meilleure stratégie. Pendant cette phase les élèves ont le droit de prendre des notes mais pas de manipuler sur le circuit. Chaque équipe élabore sur une grande feuille de papier la stratégie qu'elle estime gagnante sous la forme des schémas successifs d'associations de résistors. Aucun contrôle expérimental n'est accepté lors de cette phase. Les équipes affichent ensuite les stratégies qu'elles ont élaborées.

- **Phase 3 (validation) 20 minutes**

Chaque affiche est examinée par les autres équipes. Chaque étape proposée est alors acceptée comme vraie ou rejetée comme fausse. À ce stade, des contrôles expérimentaux sont autorisés pour trancher entre les différents points de vue. À l'issue de ce travail, les erreurs étant identifiées pour chaque affiche, on calcule les points marqués par chacune de équipes en comptant pour un point chaque étape accep-

le jeu se déroule
en 5 phases

tée et en déduisant du total un point par erreur identifiée. L'équipe gagnante est celle qui marque le plus de points.

- **Phase 4 (formulation) 20 minutes**

Il s'agit ici d'apprendre à gagner. Dans ce but, les équipes doivent élaborer des règles empiriques permettant de rendre compte des variations de l'intensité dans la branche du générateur en fonction des modifications apportées aux associations de résistors. Lorsque, dans chaque équipe, il y a accord sur les règles empiriques, celles-ci sont écrites et affichées.

- **Phase 5 (validation) 20 minutes**

Un membre de chaque équipe présente les règles élaborées à la classe et en justifie oralement la validité en s'appuyant sur les stratégies gagnantes mises au point dans les phases précédentes. Un débat, portant sur l'ensemble des productions, permet d'élaborer la formulation qui sera retenue, chaque règle est écrite sous le contrôle critique des équipes concurrentes.

4. PREMIERS RÉSULTATS

Le protocole ci-dessus a été proposé et étudié à quatre reprises : deux fois en classe de Troisième de collège (niveau 9) et deux fois en Seconde de lycée (niveau 10). Dans chaque cas, le jeu a été proposé au deuxième semestre et n'a été précédé d'aucun enseignement d'électricité pendant l'année. Le recueil des données a été effectué par enregistrement vidéo des élèves et des groupes pendant les séances. Les productions des élèves et des équipes ont également été utilisées. L'examen des bandes semble permettre dès à présent une première analyse du processus d'appropriation du jeu par les élèves et de leur implication. Il témoigne de plus, avec les productions des groupes, de la nature et du niveau des connaissances construites.

4.1. Étude du fonctionnement des différentes phases du jeu

Toutes les phases se sont toujours déroulées comme prévu : le souci de gagner, l'esprit de compétition entre les individus (phase 1) et entre les équipes (phases 2 et 3) ont créé un enjeu important qui semble avoir très fortement mobilisé les élèves autour des tâches qui leur ont été proposées. Le contrat entre les élèves n'est plus de type coopératif mais compétitif ainsi qu'en témoignent, à titre d'exemple, les extraits suivants :

Véronique : *Plus que cinq secondes... il te reste une seconde ... Allez stop !...*

un contrat
entre les élèves
plus compétitif
que coopératif...

Olivier : *Vas-y branche !... branche !... 77..., c'est pas vrai ! Ben, tu m'as dépassé...*

Les phases de formulation et de validation ont, en particulier, montré le très grand investissement des élèves dans le processus de construction des connaissances. L'extrait suivant, pris lors de la phase 2 alors que les équipes doivent élaborer sur papier une stratégie gagnante, rend bien compte de ce phénomène.

Marie : *Il faudrait trouver des trucs mixtes...*

Philippe : *Je crois qu'il y a un truc avec deux en dérivation... Logiquement...*

... et des situations qui témoignent du très grand investissement de ceux-ci

Marie : *... .. Eh bien voilà ! Quand on n'en met qu'une là comme ça, ça fait en série... donc... la boucle... y en aura deux et ce sera juste après...*

Alain : *Regarde, là t'en a trois en série, t'en remets une en dérivation ici...*

Magali : *Ouais, ici voilà... Ça y est, j'ai compris... Donc là on passe à un autre truc donc là il faudrait deux en dérivation.*

Alain : *Non en série.*

Magali : *En dérivation... Parce qu'autrement ça fait comme avant... Et puis les deux dernières, après, en série...*

L'enseignant s'est toujours trouvé très peu sollicité et lorsqu'il l'a été, ce fut pour arbitrer des conflits de points de vue relatifs au respect des règles et non pour assister des élèves en difficulté par rapport à la tâche.

Pierre : *Madame, venez voir, j'ai fait tout à l'heure 117 et maintenant je fais 112 avec le même branchement.*

Maxime : *Mais non ! C'est pas vrai Madame, il fait 112, ça fait moins !*

le milieu sanctionne les anticipations

Le recours au milieu constitué par le montage électrique a été systématique, notamment lors des phases 1 et 3, pour trancher et donc valider les propositions élaborées par anticipation. L'exemple ci-dessous concerne une vérification qui pose problème parce qu'elle donne le même résultat pour deux montages apparemment différents mais en réalité équivalents. Les élèves n'avaient pas prévu ce phénomène.

Pierre : *Attends, attends !... (il vérifie le montage)*

Marie : *(elle appuie sur le bouton)... 29,3*

Pierre : *(reprend l'autre montage)... 29,4... 29,3... Eh ça marche pas, c'est pareil !...*

Maxime : *Ça marche pas, c'est les deux mêmes...*

Marie : *C'est pas possible ! ?...*

4.2. Étude des connaissances construites

Remarquons tout d'abord que les règles du jeu ont été élaborées en vue de favoriser chez les élèves les changements conceptuels attendus. Toute l'activité repose en effet sur la recherche d'une modification de l'intensité du courant dans la branche du générateur, obtenue uniquement en agissant sur le nombre et le montage des récepteurs, alors que le générateur n'est pas modifié. Ainsi tout concourt à ce que les élèves admettent que l'intensité n'est pas seulement la

un jeu qui vise
le changement
conceptuel et
l'ébranlement
des obstacles

conséquence des caractéristiques du générateur mais qu'elle dépend en fait de la composition et de la structure du circuit tout entier. De plus, la nécessité de prévoir l'évolution de l'intensité tout au long du jeu les oblige à recourir à des raisonnements complexes qui préfigurent ceux qui interviendront ultérieurement lorsque, munis du modèle canonique, ils devront résoudre un problème de circuit.

Au départ, la construction des connaissances est fortement liée au désir de gagner comme en témoignent les extraits donnés précédemment. Dans ce cadre la connaissance, associée au contexte du jeu est d'abord construite par les élèves en tant que meilleure stratégie pour battre son adversaire. C'est ainsi que les enseignants expérimentateurs nous ont signalé, à plusieurs reprises, que des élèves revenaient spontanément la semaine suivante avec des propositions souvent très élaborées de stratégies gagnantes dont certaines comportaient plus de 20 étapes classées correctement. Les règles empiriques élaborées et discutées lors des phases 4 et 5 attestent d'un haut niveau d'exigence cognitive de la part des élèves ainsi que nous pouvons le constater dans l'exemple suivant qui concerne le débat de la phase 5.

Laeticia (qui présente à la classe la production de son équipe) : *La série diminue d'intensité, le montage en parallèle augmente l'intensité. En série, plus il y a de résistors, plus l'intensité diminue, en parallèle, plus il y a de résistors plus l'intensité augmente.*

Laurent : *Madame, est-ce que je pourrais dire ceci ? Heu... Quand on a un circuit en dérivation... si, on rajoute des résistors en série, l'intensité diminue.*

(Une voix) : *Ça dépend du nombre de résistors...*

Magali : *Ça dépend, ... ça dépend par rapport à quoi on part.*

Marie : *Oui mais par rapport à un montage donné, si on en met en série, ça va diminuer...*

Au cours de la séance, le statut de la connaissance a évolué, l'outil élaboré initialement dans le contexte du jeu comme stratégie gagnante a pris dans les phases 4 et 5 un caractère plus général. Le rôle de l'enseignant consistera ensuite à finir de décontextualiser cet outil au cours d'une phase d'institutionnalisation.

5. PROCESSUS DIDACTIQUES EN JEU DANS CES SITUATIONS

5.1. Étude du processus de dévolution et du fonctionnement a-didactique des situations

Les exemples ci-dessus, qui nous paraissent illustrer l'ensemble des données actuellement en notre possession, témoignent d'un fonctionnement du rapport au savoir que

le fonctionnement
a-didactique
du jeu
des résistors...

Brousseau qualifie d'*a-didactique* en ce sens que "l'élève sait bien que le problème a été choisi pour lui faire acquérir une connaissance nouvelle mais [...] que cette connaissance est entièrement justifiée par la logique interne de la situation et qu'il peut la construire sans faire appel à des raisons didactiques." (Brousseau, 1986, p. 49). Brousseau définit, en effet, une situation *a-didactique* comme une situation dans laquelle interviennent l'élève, l'enseignant et le milieu avec les caractéristiques que nous donnons ci-dessous (Bessot, 1993).

... est lié à
des caractéristiques
du milieu, de l'élève
et de l'enseignant

- Le milieu est constitué par le système antagoniste de l'élève (ici le jeu des résistors et l'adversaire). Il est organisé par l'enseignant en fonction d'une intention didactique génératrice de sens vis-à-vis du savoir en jeu. Il est producteur d'un système de contraintes qui conditionnent le fonctionnement de la connaissance (ici les règles du jeu et les tâches à effectuer qui évoluent au cours des phases). Il rétroagit sur l'élève (*validation*) en termes de réponse positive ou négative à son action (c'est l'indication du milliampèremètre qui décide de la suite).

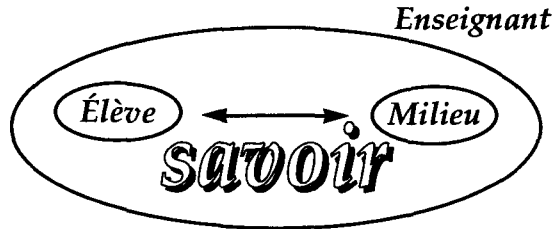
- L'élève apprend en s'adaptant au milieu générateur de contradictions, de difficultés, de déséquilibres (assimilation, accommodation). Il modifie ainsi son rapport au savoir en construisant ses connaissances comme réponses aux exigences du milieu et non au désir de l'enseignant (il ne s'agit pas ici de deviner une réponse attendue par l'enseignant mais d'élaborer et de formaliser une stratégie gagnante).

la dévolution :
un transfert
de responsabilité
du maître
à l'élève

- L'enseignant construit et organise le milieu, en fonction du savoir en jeu, en vue de produire sur l'élève les effets attendus (ici d'ébranler ses conceptions). Son rôle, pendant les phases d'action, de formulation et de validation, n'est pas de donner une réponse mais d'assurer le fonctionnement normal de la situation. Il doit donc permettre un changement de contrat didactique en faisant en sorte que l'élève, non seulement accepte les règles du jeu qui lui sont proposées, mais encore accepte, en s'investissant dans le jeu, la responsabilité de construire des connaissances en rapport avec la situation proposée. En jouant au jeu des résistors, les élèves savent bien qu'il s'agit pour eux de construire des connaissances de physique, ce qu'ils font en élaborant les règles empiriques (phase 4) puis en les discutant (phase 5). C'est ce processus de transfert de responsabilité du maître à l'élève que Brousseau désigne par le terme de *dévolution*. À la fin (ici après la phase 5), reprenant les connaissances construites par les élèves au cours de la situation, l'enseignant leur confère le statut de savoir au sens où, en les décontextualisant de la situation du jeu des résistors, il les fait apparaître en tant qu'outils susceptibles d'intervenir dans la résolution de problèmes différents. Brousseau qualifie ce processus d'*institutionnalisation*.

Comme on le voit, le fonctionnement a-didactique d'une situation est caractérisé par l'interaction privilégiée entre

l'élève et le milieu, interaction réglée par les contraintes du milieu et non directement par l'enseignant. Bien sûr, le savoir en jeu est présent, mais en arrière-plan seulement jusqu'à la phase d'institutionnalisation. C'est ce qu'essaie de traduire le schéma suivant.

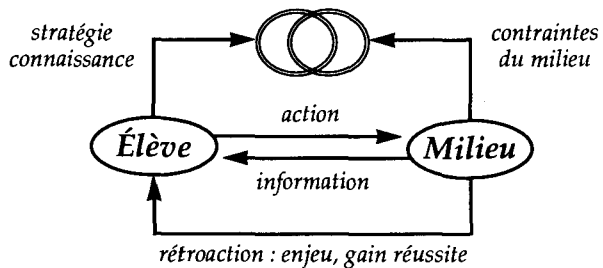


5.2. Caractérisation des phases utilisées dans le jeu des résistors

L'élève joue avec les règles du jeu. L'enseignant, de son côté, joue à changer ces règles. De là apparaissent différentes phases qui correspondent chacune à un système de contraintes particulier. Nous avons construit les différentes phases du jeu des résistors en nous inspirant toujours de la théorie de Brousseau. Nous en donnons ci-dessous les caractéristiques essentielles.

• Phase d'action

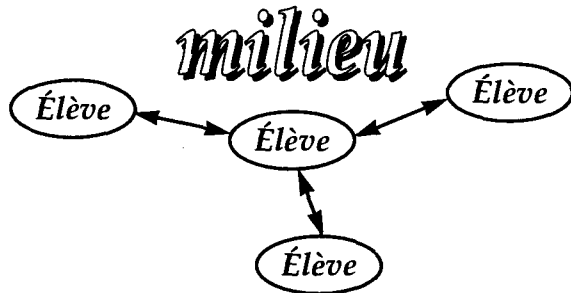
L'élève qui joue agit sur le milieu lequel lui renvoie de l'information : il a gagné et il marque un point ou bien il a perdu et il doit céder la place. Tout au long de cette phase, chacun des deux joueurs élabore sa stratégie personnelle et donc des connaissances pour gagner. Le respect des règles du jeu, constaté par l'adversaire, constitue l'essentiel des contraintes du milieu. L'enjeu est essentiellement constitué par la réussite censée témoigner de la supériorité de la stratégie du joueur face à celle de l'adversaire.



• **Phases de formulation**

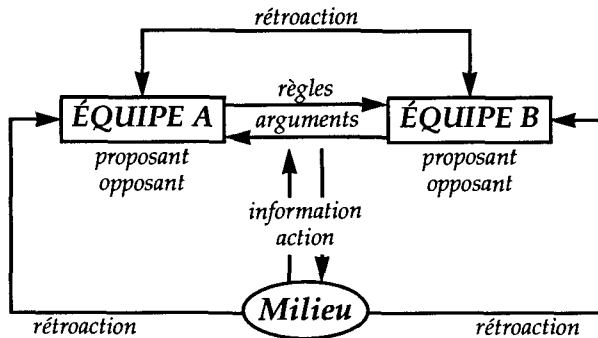
Elle sont essentiellement constituées par des discussions entre élèves d'une même équipe. Il s'agit, ou bien de comparer les diverses stratégies et de choisir celle que l'on va présenter aux autres, ou bien d'élaborer ensemble des règles empiriques. Au cours d'une phase de formulation, le milieu n'est présent que par la pensée, en arrière-plan des évocations mais il n'est plus matériellement disponible pour répondre aux questions qui apparaissent dans le débat.

le système actions-réactions est différent selon les phases



• **Phases de validation**

Lors de ces phases, il y a débat entre les équipes. La communication qui a lieu entre elles a pour fonction de faire qu'apparaissent des propositions et des oppositions à travers la formulation de règles ou d'arguments. Dans ce débat, les équipes sont à égalité de moyens et de droit. L'objectif est ici de valider des propositions. Pour ce faire, elles peuvent, en particulier recourir au milieu qui est à nouveau disponible et agir sur lui pour décider, en fonction des informations reçues en retour, de qui a raison et qui a tort. Il y a donc rétroaction du milieu sur les équipes. Mais les équipes peuvent également échanger des arguments et tenter de convaincre par la logique. Il y a donc également rétroaction entre les équipes.

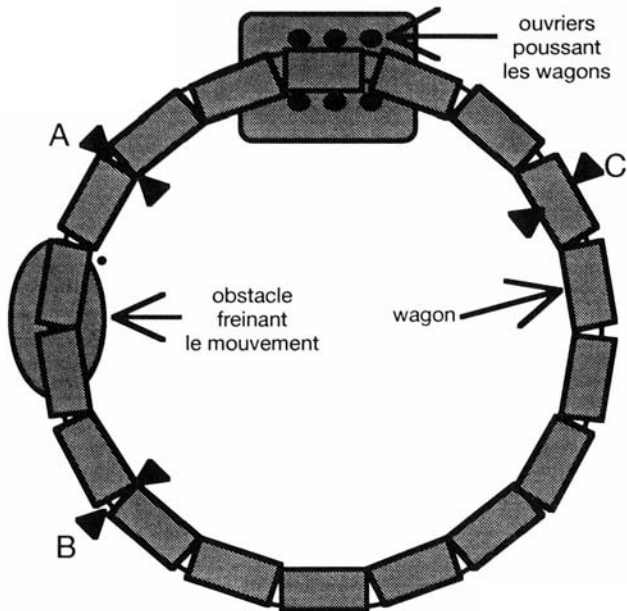


6. INSERTION DU JEU DES RÉSISTORS DANS L'ENSEIGNEMENT DE L'ÉLECTROCINÉTIQUE : IMPLICATIONS DIDACTIQUES

Rappelons que les cinq phases du jeu ont été conçues pour être introduites successivement dès le début de l'enseignement. Par conséquent, comme nous l'avons déjà dit, aucun travail en électrocinétique n'avait été réalisé avec les élèves au cours de l'année avant le jeu des résistors. La mise en œuvre des cinq phases a été réalisée en une séance de deux heures ou en deux séances consécutives.

À la fin de la phase 5, les élèves disposent de deux règles empiriques qui peuvent s'énoncer de la manière suivante :
 1. *Lorsqu'on ajoute un élément en série avec un autre élément (ou avec une association d'éléments), l'intensité du courant qui sort du générateur diminue.*
 2. *Lorsqu'on ajoute un élément en parallèle sur un autre élément (ou sur une association d'éléments), l'intensité du courant qui sort du générateur augmente.*

le fonctionnement du circuit est interprété par l'analogie modélisante du train



Pour la suite, et afin de mieux rendre compte de ces phénomènes, nous nous sommes inspirés de la démarche utilisée par Johsua, démarche qui prend appui sur l'«*analogie modélisante*» du train. «*Notre analogie (analogie abstraite fonctionnant comme une expérience de pensée et ne conduisant jamais à des manipulations pratiques) décrit le fonctionnement d'un train hypothétique. [...] Un train circule dans un*

circuit fermé. Il est constitué de wagons (pas de locomotive) rigidement liés entre eux et régulièrement espacés. Dans une gare, des ouvriers poussent avec une force constante sur les wagons qui passent devant eux. Des freins existent sur la voie, lesquels influencent la vitesse du train." (Johsua, 1989).

cette analogie,
qui contribue
elle aussi
à ébranler
les obstacles
donne du sens
au modèle

On l'aura compris : il y a analogie entre le train et notre circuit, les wagons et les charges, le mouvement des wagons et le courant électrique, la vitesse à laquelle passe un wagon en un point et l'intensité du courant en un point du circuit, les ouvriers poussant les wagons et le générateur, la force de poussée des ouvriers et la force électromotrice du générateur, l'importance du freinage et la résistance des résistors montés sur la plaque de connexion. Ainsi, l'analogie permet de comprendre, non seulement qu'une action sur les résistors du circuit puisse entraîner une modification de l'intensité du courant délivré par le générateur, mais encore que cette intensité soit la même tout au long de la branche contenant le générateur. De plus, l'analogie du train permet de résoudre une contradiction essentielle soulevée par Johsua : le fluide électrique se conserve sous sa forme matérielle tout en permettant, telle une courroie, la transmission de l'énergie du générateur vers les récepteurs.

Nous avons d'abord fait travailler les élèves en petits groupes autour des questions ci-dessous, chaque petit groupe devant successivement effectuer des prévisions précises et argumentées à partir d'exemples et suivies ensuite de vérifications expérimentales.

- L'ordre des composants intervient-il sur la valeur de l'indication du milliampèremètre ?

- Si on monte le milliampèremètre du côté de la lampe, l'indication sera-t-elle modifiée ? Si oui dans quel sens et pourquoi ?

Prenant appui sur les résultats obtenus par les groupes nous avons institué un modèle qualitatif de l'électrocinétique (modèle donné en annexe). Avec des élèves de lycée, la suite de l'enseignement fut organisé de manière analogue, c'est-à-dire autour de situations-problèmes donnant lieu à des questions telles que :

- Comment prévoir la valeur de l'intensité du courant qui s'établit dans la branche du générateur ?

- Comment prévoir les intensités dans les différentes branches contenant les résistors ?

- Et si l'on remplace un résistor par un autre dipôle ? (lampe, diode, pile, etc.)

Le travail sur ces situations a permis d'instituer des modèles quantitatifs de plus en plus performants c'est-à-dire permettant de répondre à des questions de plus en plus nombreuses et correspondant à des circuits de plus en plus complexes (deux exemples de ces modèles sont donnés en annexe).

Comme on peut le constater, la transposition didactique adoptée dans cet enseignement peut être caractérisée par

l'enseignement
est organisé
autour
de situations-
problèmes
de plus en plus
complexes

respect
d'un principe
de nécessité

un découpage du savoir à enseigner différent de celui qui est réalisé habituellement. Ici, nous nous sommes volontairement écartés d'un découpage fondé sur une séparation des concepts (l'intensité et ses lois de conservation, puis la différence de potentiel et sa loi d'additivité, puis les dipôles, la loi d'Ohm et les caractéristiques, etc.). Nous avons au contraire opté pour une organisation fondée sur la résolution de situations-problèmes de plus en plus complexes, concernant l'étude de circuits, et susceptibles de mettre à l'épreuve les conceptions et modes de raisonnement des élèves, en privilégiant toujours la construction du sens à travers une démarche de modélisation (Robardet, Guillaud, 1997). Les notions de bases sur lesquelles nous nous sommes appuyés dès le début furent celles de force électromotrice (E), d'intensité (I) et de résistance équivalente (R), liées ensuite entre elles par la relation $E = R.I$ (Loi de Pouillet), et définies au niveau du circuit tout entier. Toutes les grandeurs ont été introduites dans le respect d'un principe de nécessité selon lequel un élément théorique n'est introduit que pour résoudre un problème nouveau ; en particulier, la notion de tension n'a été introduite que lorsqu'elle est devenue nécessaire pour pouvoir déterminer les valeurs des intensités dans les branches autres que celle du générateur. Le modèle a été construit en plusieurs étapes selon une démarche d'emboîtement de modèles successifs. Chaque nouvelle situation faisant apparaître l'inadaptation du modèle précédent et la nécessité de le perfectionner pour résoudre, reprenant ainsi une démarche que nous avons déjà utilisée en mécanique (Robardet, 1995). Nous laisserons le dernier mot à une élève à la sortie de la première séance sur le jeu des résistors : *Série, dérivation... tu sais, avant je mélangeais tout. Maintenant, c'est gravé là !*

Guy ROBARDET,
LIDSE Université Joseph-Fourier,
IUFM de Grenoble.

BIBLIOGRAPHIE

- BESSOT A., 1993, "Panorama des cadres théoriques de la didactique des mathématiques en France", *Séminaire du CIRADE "Connaissance, Représentation et Apprentissage"*, Publications de l'IQAM, Montréal, Québec.
- BROUSSEAU G., 1986, "Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques", *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol. 7-2, pp. 33-115.
- BROUSSEAU G., 1988, "Le contrat didactique : le milieu", *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol. 9, pp. 309-336.
- CLOSSET J.-L., 1983, *Le raisonnement séquentiel en électrocinétique*, Thèse, Université Paris 7.
- CLOSSET J.-L., 1989, "Les obstacles à l'apprentissage de l'électrocinétique", *Bulletin de l'Union des Physiciens*, N° 716, pp. 931-949.
- JOHSUA S., 1989, "Les conditions d'évolution de conceptions d'élèves", in N. Bednarz & C. Garnier Eds. *Construction des savoirs, obstacles & conflits*, CIRADE Agence d'Arc inc. Ottawa, pp. 306-314.
- JOHSUA S., DUPIN J.-J., 1989, *Représentation et modélisation : le "débat scientifique" dans la classe, et l'apprentissage de la physique*, Berne : Peter Lang, pp. 46-83.
- JOHSUA S., DUPIN J.-J., 1993., *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*, Paris : P.U.F., pp. 171-178.
- ROBARDET G., 1995, "Situations-problèmes et modélisation ; l'enseignement en lycée d'un modèle newtonien de la mécanique", *Didaskalia*, N°7, Paris, Bruxelles : de Boeck, pp. 129-143.
- ROBARDET G., GUILLAUD J.-C., 1997, *Éléments de didactique des sciences physiques : théories, modèles, conceptions et raisonnement spontané*, Paris : PUF, Coll. Pédagogies d'aujourd'hui.
- VIENNOT L., 1996, *Raisonnement en physique : la part du sens commun*, Paris, Bruxelles : de Boeck.

ANNEXES
**MODÈLE QUALITATIF DE L'ÉLECTROCINÉTIQUE
(PREMIER MODÈLE)**

Usage du modèle et champ expérimental de référence

Ce modèle s'applique à tout circuit ne comportant que des dipôles. Il permet de prévoir le sens des variations de l'intensité du courant qui circule dans la branche du générateur lorsqu'on modifie le circuit en ajoutant ou en retirant un récepteur.

Notions du modèle

- Un matériau conducteur d'électricité est représenté comme un récipient **complètement rempli** de particules pouvant se déplacer à l'intérieur.
- Un circuit électrique est représenté par une suite fermée d'éléments conducteurs communicant les uns avec les autres (les particules qui remplissent complètement le circuit pouvant passer de l'un à l'autre).
- Le **courant électrique** est représenté par la circulation des particules mobiles tout au long des éléments du circuit. Un élément particulier, appelé **générateur**, est responsable de cette circulation. Son rôle est de maintenir le mouvement des particules qui en sortent par le pôle positif et y entrent par le pôle négatif. Les autres éléments traversés par les particules sont appelés **récepteurs**.
- En un point du circuit, l'**intensité** du courant I (en Ampère A) est la grandeur qui représente la valeur du débit des particules en mouvement.
- La **force électromotrice** du générateur E (en Volt V) est la grandeur qui représente le pouvoir du générateur de mettre et de maintenir les particules mobiles en mouvement.
- La **résistance** R (en Ohm Ω) est la grandeur qui représente le pouvoir qu'a un élément ou un ensemble d'éléments de freiner le passage des particules mobiles.

Règles du modèle

1. Tout circuit est rempli de particules ; on ne peut ni en ajouter, ni en retirer, ni en détruire : **leur nombre est constant** pour un circuit donné.
2. Les particules mobiles présentes dans un circuit constituent un ensemble **incompressible**. Elles ne peuvent que circuler dans le circuit mais pas s'accumuler.
Ainsi, l'intensité du courant est **la même** en tous points d'une chaîne d'éléments montés **en série**. Les intensités **se partagent en s'additionnant** dans les **dérivations**.
3. Lorsqu'on ajoute un élément en série avec un autre élément (ou avec une association d'éléments), on augmente la résistance de l'ensemble au passage du courant.
4. Lorsqu'on ajoute un élément en parallèle sur un autre élément (ou sur une association d'éléments), on diminue la résistance de l'ensemble au passage du courant.
5. L'intensité du courant qui traverse le générateur augmente :
 - lorsque la valeur de la force électromotrice du générateur augmente,
 - lorsque la résistance de l'ensemble des récepteurs diminue.

PREMIER MODÈLE QUANTITATIF DE L'ÉLECTROCINÉTIQUE

Usage du modèle et champ expérimental de référence

Ce modèle permet de calculer l'intensité du courant qui circule dans la branche du générateur. Il s'applique aux circuits dont les récepteurs fonctionnent en régime linéaire (résistors) et dans lesquels la résistance interne du générateur est négligée.

Notions du modèle

(identiques à celle du modèle précédent)

Règles du modèle

1. L'intensité est la même en tout point d'une chaîne d'éléments montés en série. Les intensités se partagent en s'additionnant dans les dérivations.
2. La résistance équivalente à 2 résistors montés en série est égale à la somme de leurs résistances individuelles : $R_{eq} = R_1 + R_2$

La résistance équivalente à deux résistors montés en parallèle est donnée par la règle :

$$R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

3. L'intensité du courant qui parcourt la branche contenant le générateur est reliée à la force électromotrice du générateur et à la résistance équivalente de l'ensemble des résistors du circuit par la relation :

$$I = \frac{E}{R_{eq}}$$

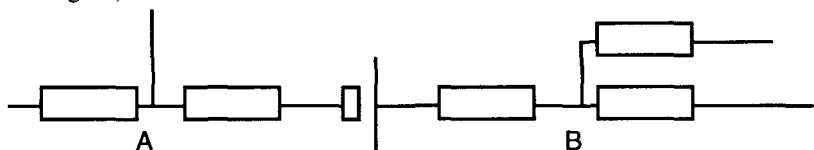
MODÈLE DE L'ÉLECTROCINÉTIQUE (MODÈLE FINAL)

Usage du modèle et champ expérimental de référence

Ce modèle permet de prévoir les intensités des courants qui circulent dans les branches du circuit. Il s'applique aux circuits dont les récepteurs sont des dipôles.

Notions du modèle

- Nœud : point d'un circuit relié à plus de deux composants (exemple : A et B sur la figure).
- Branche : portion de circuit située entre deux nœuds consécutifs (exemple : AB sur la figure).



- Le courant électrique est représenté par une circulation de charges positives sortant du générateur par le pôle positif et y entrant par le pôle négatif.
- Intensité I (en Ampère A) : grandeur qui représente le débit des charges électriques et qui se mesure au moyen d'un ampèremètre monté dans la branche concernée.
- Force électromotrice E (en Volt V) : grandeur qui représente le pouvoir du générateur à mettre en circulation des charges mobiles du circuit et qui se mesure au moyen d'un voltmètre monté sur le générateur non connecté au circuit.
- Résistance R (en Ohm Ω) : grandeur qui représente le pouvoir qu'a un résistor ou un ensemble de résistors de freiner le passage des charges mobiles et qui se mesure au moyen d'un ohmmètre monté sur le composant non connecté.
- Potentiel électrique V (en Volt V). C'est une grandeur qui caractérise l'énergie disponible dans une charge dont la circulation représente le courant électrique. Toutes les charges qui se trouvent en un même point A du circuit ont le même potentiel électrique noté V_A ou $V(A)$. Le potentiel électrique au point A se mesure avec un voltmètre dont la borne de référence (COM) est branchée au pôle négatif du générateur et dont la borne de fonction (V) est branchée en A.

Règles du modèle

1. L'intensité se conserve en tout point d'une même branche.
L'intensité se conserve en se partageant ou en se regroupant en tout nœud.
2. La résistance équivalente à 2 résistors montés en série est égale à la somme de leurs résistances individuelles : $R_{eq} = R_1 + R_2$
La résistance équivalente à deux résistors montés en parallèle est donnée par la règle :

$$R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

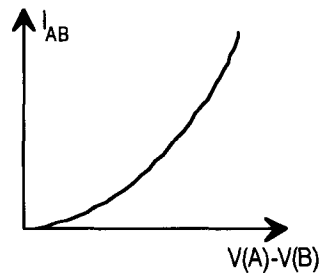
3. L'intensité du courant qui parcourt la branche contenant le générateur est reliée à la fém du générateur et à la résistance équivalente de l'ensemble des résistors du circuit par la relation :

$$I = \frac{E}{R_{eq}}$$

4. Toutes les charges d'une même connexion sont au même potentiel.
 5. Une charge qui traverse un composant cède à celui-ci, ou reçoit de celui-ci, de l'énergie. Ainsi le potentiel électrique V diminue lorsqu'elle traverse un récepteur. Il augmente lorsqu'elle traverse le générateur. $V = 0$ au pôle négatif du générateur.
 6. La diminution du potentiel entre l'entrée A et la sortie B d'un récepteur dépend de l'intensité I_{AB} du courant qui le traverse. Cette dépendance peut être représentée par une fonction croissante (f) telle que : $V_A - V_B = f_{\uparrow}(I_{AB})$
- ⇒ Si on modélise le récepteur AB par une loi linéaire sa résistance est une constante R donnée par la relation :

$$R = \frac{V_A - V_B}{I_{AB}}$$

- ⇒ Si nécessaire, un modèle plus précis des fonctionnements possibles d'un dipôle récepteur peut être obtenu par la courbe représentative de la fonction f appelée caractéristique du dipôle.



7. Le potentiel du pôle positif P du générateur est donné par la relation $V_P = E - r \cdot I$ dans laquelle E est la fém et r la résistance interne du générateur (si cette dernière est négligée alors $V_P = E$)