

Actes du Congrès
COLLÈGES CÉLÉBRATIONS 92
Conference Proceedings



MONTRÉAL MAY 24 25 26 27 MAI 1992

**Approche système dans l'enseignement
de l'électronique analogique**

par

Jude LEVASSEUR et Bernard LEGAULT, enseignants
Cégep André-Laurendeau
(Québec)

Claude BRASSARD, enseignant
Institut d'ordinique du Québec
(Québec)

Atelier 1B11

*Collèges
créateurs d'avenir*

*Colleges
creators of the future*



Association des collèges
communautaires du Canada



Association québécoise de
pédagogie collégiale

Approche système dans l'enseignement de l'électronique analogique[†]

J. Levasseur et B. Legault, Collège André-Laurendeau, Lasalle, Qc,

C. Brassard, Institut d'ordinique, Collège Lionel-Groulx, Sainte-Thérèse, Qc.

À chacune des révisions du programme d'Électrotechnique, les contenus se sont toujours alourdis à cause de la présence des nouvelles technologies, laissant une place de plus en plus restreinte pour les concepts de base de l'électronique analogique. De récents travaux de recherche montrent clairement les piètres performances de nos élèves face à cette formation de base. Il est donc urgent de développer une nouvelle didactique de discipline qui sera à la fois performante et adaptée aux exigences du programme et aux possibilités des élèves.

1. INTRODUCTION

Si l'apprentissage des circuits électriques et électroniques est difficile, son enseignement l'est encore davantage. Les difficultés se manifestent au secondaire (Cohen & al., 1983), au collégial (Métoui & al., 1990) ainsi qu'à l'université (Rohrer, 1990). En plus des études citées plus haut, qui proviennent respectivement d'Israël, du Québec et des États-Unis, d'autres travaux réalisés en France (Closset & al., 1984) et en Angleterre (Shipstone, 1984) indiquent que les problèmes d'apprentissage sont très répandus, probablement généralisés.

Les représentations naïves ont tendance à survivre à un apprentissage formel (Métoui, 1990). Ce phénomène a été observé dans différentes disciplines (Driver, 1981), et en particulier dans le cas des circuits électriques (Dupin & al., 1987; Closset & al., 1984). Des représentations erronées résultant de l'enseignement (Lavoie & al., 1991a; Dupin & al., 1987) ont également été mises en évidence.

La plupart des études réalisées sur le sujet s'adressent à des notions très élémentaires d'électricité, dans une première approche de l'enseignement des sciences. Notre étude porte également sur des notions de base, mais dans le contexte peu plus évolué de la formation technique au collégial.

L'approche traditionnelle de la didactique des circuits électriques et électroniques est présentement remise en question, car elle souffre de faiblesses inhérentes et ne convient guère aux exigences actuelles de la technologie. Une nouvelle approche développée et expérimentée dans les collèges Lionel-Groulx (Brassard, 1990) et André-Laurendeau donne des résultats très encourageants (Métoui & al., 1990). Cette *approche système* s'inscrit dans le courant de pensée systémique et à ce titre, elle cadre parfaitement dans les nouveaux programmes de Technologies du Génie électrique.

2. ÉCHECS ET ABANDONS

La famille d'Électrotechnique était réputée pour son fort taux d'échecs et d'abandons : 13% de diplomation sur la période normale de 3 ans, ces dernières années (Laroche & al., 1990). C'est la pire performance de l'ordre collégial, au Québec.

Parmi les causes qui peuvent être envisagées pour expliquer ce phénomène, on peut noter les problèmes d'orientation, les exigences académiques relativement élevées pour un secteur professionnel, le niveau de préparation inadéquat des élèves (Laroche, 1988), ainsi que le travail à l'extérieur. Ce sont là

des facteurs inhérents ou sociaux que, comme enseignants, nous contrôlons plutôt mal.

Comme enseignants, nous avons un contact privilégié avec les élèves, et le sentiment des auteurs est que certains d'entre eux abandonnent parce qu'ils vivent une certaine insécurité face à leur apprentissage. Cette insécurité se développe lorsqu'ils réalisent qu'ils ne comprennent pas la matière enseignée. Nous avons ainsi été amenés récemment à nous poser la question fatidique : ce qu'on leur enseigne est-il compréhensible pour eux? Notre réponse très franche est : non!

Les difficultés d'apprentissage pourraient avoir une incidence sur le décrochage. Cette prise de conscience s'est ajoutée à notre réalisation que l'approche traditionnelle de l'enseignement de l'analogique ne pouvait supporter adéquatement les développements technologiques récents, réalisés dans le cadre d'un paradigme systémique.

Ces conclusions ont eu un impact certain sur la révision récente des programmes, révision qui a donné naissance aux cinq programmes de la famille des Technologies du Génie électrique. À l'origine, le Comité d'élaboration devait alléger les contenus; à l'examen, il est apparu que le débordement des contenus était lié à un problème qualitatif de démarche, qu'un simple élagage ne permettrait pas de le régler. Et c'est dans l'apprentissage de l'électronique analogique, précisément où les élèves éprouvent le plus de difficulté, que le problème de démarche était le plus évident.

3. DEUX PARADIGMES

L'approche traditionnelle et l'approche système divergent au niveau de la didactique, pas seulement de la pédagogie : les contenus ne sont pas les mêmes. De plus, le conflit est d'une ampleur telle que l'on peut véritablement parler d'un saut épistémologique, d'un changement de paradigme.

3.1. L'approche traditionnelle

Certains auteurs, comme Boylestad (1979, 1981) et Malvino (1980), ont réussi à structurer les contenus d'électronique d'une manière cohérente et à les rendre accessibles aux futurs techniciens[§]. Leurs ouvrages ont formé toute une génération

[†] Recherche supportée par le PRDF et par la DGEC.

[§] Le masculin est utilisé ici au sens générique, pour éviter d'alourdir le texte.

d'élèves. Ces manuels, ainsi que la pratique de l'enseignement qui s'en inspire, constituent une véritable tradition.

Cette tradition montre cependant de grands signes de faiblesse. L'enquête réalisée par Métioui & al. (1990) souligne la présence de graves lacunes dans la structure conceptuelle des élèves ayant suivi un enseignement traditionnel. La nature de plus en plus intellectuelle du travail de technicien a pour effet de mettre ces lacunes en évidence en situation de travail. Dans le présent article, ces difficultés sont attribuées en grande partie à des failles inhérentes de l'approche traditionnelle.

Le monde du travail a adopté une approche système, qui est fondamentalement *irréconciliable* avec l'approche traditionnelle. Comme praticiens, nous ne pouvons éviter d'utiliser l'approche système, mais nous continuons le plus souvent d'enseigner selon l'approche traditionnelle de notre formation initiale. Il est sécurisant de reproduire sa propre démarche initiale d'apprentissage dans la pratique de l'enseignement. De plus, en 1992, il n'existe pas encore de manuel technique qui se conforme intégralement à l'approche système.

Devons-nous insister pour que nos élèves refassent tout le cheminement que nous-mêmes avons suivi, ou les guider dans le plus court chemin qui mène à une compétence technique?

3.2. L'approche système

L'approche système constitue essentiellement l'application à l'électronique analogique de l'approche systémique (De Rosnay, 1975), et s'inscrit dans un vaste courant idéologique.

Contrairement à l'approche traditionnelle, qui est basée sur l'étude du fonctionnement interne d'un dispositif (composant ou circuit), l'approche système décrit ce même dispositif en termes fonctionnels. C'est l'approche qui est déjà utilisée universellement en électronique numérique.

L'approche traditionnelle est réductionniste : l'étude d'un système est abordée à partir du fonctionnement de ses sous-systèmes, l'étude des sous-systèmes à partir du fonctionnement des sous-sous-systèmes, et ainsi de suite. C'est pourquoi il faut commencer avec « les bases », c'est-à-dire la physique des composants, l'électromagnétisme. Nous soulignons plus bas les difficultés que cela entraîne inévitablement.

Au contraire, dans l'approche système un dispositif est étudié en référence à un modèle fonctionnel. On n'ouvre pas la boîte noire avant d'avoir un intérêt à le faire. L'approche système va même plus loin : les modèles sont considérés comme fondamentaux, et les dispositifs physiques comme leur réalisation approximative. À ce niveau, il n'y a plus guère de réconciliation possible avec l'approche traditionnelle.

4. DIFFICULTÉS DE L'APPROCHE TRADITIONNELLE

4.1. Au secondaire

Une étude menée en Israël (Cohen & al., 1982) démontre que les représentations des élèves du secondaire ne leur permettent pas de répondre à des questions très simples touchant le fonctionnement des circuits électriques. Pis encore, l'apprentissage formel de la théorie des circuits ne semble pas améliorer

beaucoup les choses : les élèves ne sont guère meilleurs après qu'avant. Fait troublant, leurs professeurs, pour la plupart diplômés universitaires en sciences, ne se débrouillent pas beaucoup mieux.

Les questions posées par le groupe d'Israël étaient intéressantes et les résultats obtenus sont très significatifs. Malheureusement, les questions à choix multiples ne permettent pas d'inférer les représentations des élèves ni celles de leurs professeurs.

L'une de ces questions portait sur un circuit dans lequel une pile avec une résistance en série alimente deux lampes branchées en parallèle. On demandait ce qui arrive à l'une des lampes si l'autre est retirée. Seulement 35% des élèves ont tiré la conclusion correcte, à savoir que la lampe qui reste brille plus fortement. Seulement 21% des professeurs ont bien cheminé, ce qui est étonnant, sur un choix de quatre réponses.

4.2. À l'université

Aux États-Unis, Rohrer (1990) a analysé la situation de l'enseignement de la théorie des circuits dans la formation des ingénieurs en électronique. Ses conclusions constituent le pendant universitaire de l'étude de Cohen. En résumé, il considère comme inévitable de repenser toute l'approche de l'enseignement de la théorie des circuits. Voici son évaluation de la pratique actuelle de l'enseignement de la théorie des circuits dans les facultés de génie :

« *Is it any wonder that our students arrive at graduate school not knowing circuit theory? Not really, since we haven't bothered to teach it to them* ».

ainsi qu'une indication sur ce qui ne va pas :

« *No, today's electronic reality is not resistors, inductors, and capacitors. It is black boxes full of black boxes full of black boxes* ».

Si la situation laisse à désirer dans les ordres secondaire et universitaire, il ne s'agit pas là de deux phénomènes séparés, puisque les enseignants du secondaire ont été formés pour la plupart dans le milieu universitaire. Mais qu'en est-il de l'enseignement *professionnel collégial* au Québec?

4.3. Et dans notre milieu collégial québécois?

Métioui et al. (1990) ont entrepris, dans le milieu collégial québécois, une étude qualitative de très grande envergure portant sur les représentations des élèves en regard des concepts de base des circuits électriques. En février 1990, 225 élèves des collégiaux 1, 2 et 3, provenant de quatre cégeps ont répondu à un questionnaire écrit, et une quarantaine d'entre eux ont été interviewés individuellement par la suite.

Les questions orales et écrites étant toutes à grand développement, il a été possible d'inférer les représentations des élèves, en analysant soigneusement chacune des réponses dans ses moindres détails. On a découvert, par exemple, que la plupart des élèves croient que la résistance est universelle et permet de remplacer n'importe quelle boîte noire; plusieurs élèves pensent que différents courants indépendants peuvent coexister dans un même conducteur. Surtout, on s'est rendu compte que toutes les démarches des élèves se faisaient en référence au matériel; ils semblent ignorer jusqu'à l'existence même des modèles.

La plupart des élèves n'ont pu répondre d'une manière satisfaisante qu'à une question sur dix. Ces questions faisaient principalement appel aux concepts de *courant* et de *tension*. Manifestement, ces concepts sont mal assimilés. Il ne faudrait pas conclure trop vite à l'incompétence des diplômés et de leurs professeurs, mais plutôt réaliser que l'enquête nous permet de qualifier, de préciser la nature des compétences qui sont réellement développées. En effet, les élèves comprenaient les problèmes, qu'ils étaient manifestement surpris de ne pouvoir résoudre, ce qui indique déjà un niveau de compétence.

On retrouve dans le rapport Métioui une mine de renseignements détaillés sur les représentations des élèves, qui nous aide à comprendre les difficultés d'apprentissage et à en déterminer la cause la plus probable. Le présent article y puise abondamment.

5. LA PROBLÉMATIQUE

Il existe donc un malaise généralisé, qui semble mondial et que l'on retrouve à tous les ordres d'enseignement (il existe même des études touchant l'école primaire, que nous n'avons pas citées) mais où se situe le problème au juste? Nous abordons cette problématique dans la présente section.

5.1. Des choix

Les élèves formés à l'approche traditionnelle sont inhabiles à manipuler des modèles théoriques. Mais de telles habiletés sont-elles vraiment requises de la part de techniciens? Le technicien n'est-il pas plutôt un travailleur manuel qui se contente d'appliquer une recette fournie par l'ingénieur? Son intervention ne se situe-t-elle pas au niveau du matériel plutôt que des modèles théoriques?

C'est un choix. On peut choisir de considérer comme normal qu'un technicien n'arrive pas à indiquer sur un schéma le branchement d'un ampèremètre et d'un voltmètre pour mesurer un courant et une tension (question 1 du thème IV du rapport Métioui). Il faudra aussi accepter que quelqu'un d'autre lui indique où et comment brancher ses appareils, chaque fois qu'il aura à entreprendre un nouveau type de mesure. On peut également choisir de considérer comme normal qu'un technicien n'arrive pas à analyser un circuit élémentaire formé de deux sources et de deux résistances (question 1 du thème III). Qui le fera à sa place?

Dans leur fameux rapport, « Made in America », Dertouzos et al. (1989) déclarent :

«...technology has moved in directions that require a much better educated and skilled work force. ».

Ils rejoignent en cela les employeurs québécois qui ont participé aux analyses de situation de travail de l'automne 1989, et qui affirmaient que les techniciens sont maintenant des « travailleurs intellectuels ».

Les changements constants en électronique ont eu pour effet de modifier *qualitativement* le niveau d'intervention du technicien. En 1960, il étudiait à l'école le fonctionnement d'un certain nombre de circuits, et ce sont ces mêmes circuits qu'il retrouvait ensuite sur le marché du travail. La situation est

maintenant très différente : les circuits sur lesquels travailleront nos futurs techniciens ne sont pas encore développés!

L'approche traditionnelle ne vise pas que l'acquisition de recettes, mais la plupart des élèves n'en retiennent *que des recettes*. Autrement dit, les efforts déployés par les enseignants sur le plan des apprentissages conceptuels ne rencontrent pas tout le succès que l'on serait en droit d'espérer. La compétence réellement atteinte se résumerait en une familiarité avec le matériel, les pratiques et le vocabulaire, ainsi qu'un certain nombre de recettes d'importance pratique.

Pour les besoins de cet article, nous *choisirons* plutôt de considérer qu'un technicien d'aujourd'hui devrait posséder un certain degré d'autonomie lui permettant de résoudre des problèmes théoriques très simples dans son domaine. Dans une telle optique, l'approche traditionnelle ne permettrait plus de satisfaire les nouvelles exigences de la formation technique. Mais comment cela est-il vécu au niveau des programmes de formation professionnelle au collégial?

5.2. Sous l'angle des programmes

Dans un premier temps, les recettes à couvrir sont devenues si diversifiées et si nombreuses, que nous avons assisté à un *embouteillage monstre des contenus*. La diminution du nombre d'heures consacrées à l'apprentissage de l'analogique, sous la pression du numérique, est venue jeter de l'huile sur le feu. Ce débordement anarchique des contenus a été très vivement ressenti dans le programme d'Électrotechnique de 1984. Puis, dans un deuxième temps, il est apparu au Comité d'élaboration de 1990 qu'il fallait changer de niveau d'abstraction, pour s'ancrer dans une perspective plus fondamentale, où tout devient plus simple, transférable, et surtout plus durable.

Dans cette nouvelle perspective, qui est celle des programmes des Technologies du Génie électrique approuvés en 1992, on ne peut guère se payer le luxe de couvrir les contenus théoriques uniquement « pour la forme ». Il faut s'assurer de leur assimilation et surtout, de leur contextualisation dans de multiples pratiques techniques.

Le technicien n'étant plus considéré comme un travailleur uniquement manuel, un simple applicateur de recettes, il faut en tenir compte dans la *nature des compétences* à développer.

6. UN DIAGNOSTIC

La partie théorique de l'électronique passe mal, dans l'approche traditionnelle. Quelle est donc la cause de ces difficultés? S'agirait-il d'une difficulté inhérente à la matière, d'une pondération insuffisante, d'un manque d'intérêt de la part des élèves, d'un laisser aller de la part des professeurs, d'une pédagogie peu performante, ou d'une approche didactique inadéquate? Ou bien, sommes-nous en présence d'une combinaison de facteurs?

Tel que mentionné plus haut, les difficultés se manifestent mondialement et à tous les ordres d'enseignement. On est donc amené à penser qu'il peut s'agir d'une difficulté inhérente à la matière, mais la didactique peut être soupçonnée d'y contribuer, car elle s'appuie sur un paradigme répandu mondialement, et ce à tous les ordres d'enseignement. C'est pourquoi

nous avons cherché des failles dans la didactique de la discipline. Et nous en avons trouvée. Si elles ne sont pas apparues plus tôt, c'est sans doute qu'autrefois, le technicien pouvait se débrouiller à partir de quelques recettes.

Nous proposons le diagnostic suivant, qui s'appuie sur une étude soignée des représentations des élèves : nos élèves n'arrivent pas à comprendre la théorie des circuits parce que ce qu'on leur enseigne est tout à fait incompréhensible pour eux. Nous ne justifions pas ce diagnostic ici, faute d'espace; les considérations qui le fondent sont présentées ailleurs (Lavoie & al., 1991a,b; Brassard & al., 1992; Métioui & al., 1992a, b, c; Métioui & al., 1993). Nous développons cependant ici un exemple de cheminement qui illustre bien les difficultés.

7. L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL

Le cheminement d'apprentissage qui permet d'aborder l'étude de l'amplificateur de la Fig. 1 servira d'exemple pour illustrer la différence entre deux paradigmes, celui de l'approche traditionnelle et celui de l'approche système. Cette comparaison nous permettra de mettre en évidence certaines carences de l'approche traditionnelle.

7.1. Dans l'approche traditionnelle

La Fig. 2 indique le cheminement proposé dans l'approche traditionnelle. On commence par jeter les bases de la physique des composants, pour introduire la résistance et le transistor. Parallèlement, l'analyse des circuits est développée sur la base du comportement de l'électron dans des champs électriques et magnétiques (pour alléger, les bases mathématiques ne sont pas montrées explicitement sur la Fig. 2). Ensuite, les circuits sont étudiés dans un ordre croissant d'intégration, à

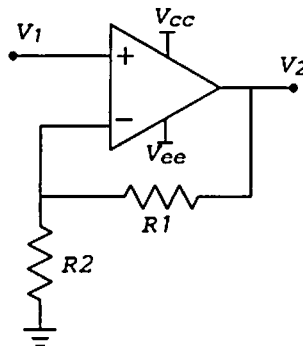


Fig. 1: Un simple circuit d'amplificateur basé sur un amplificateur opérationnel.

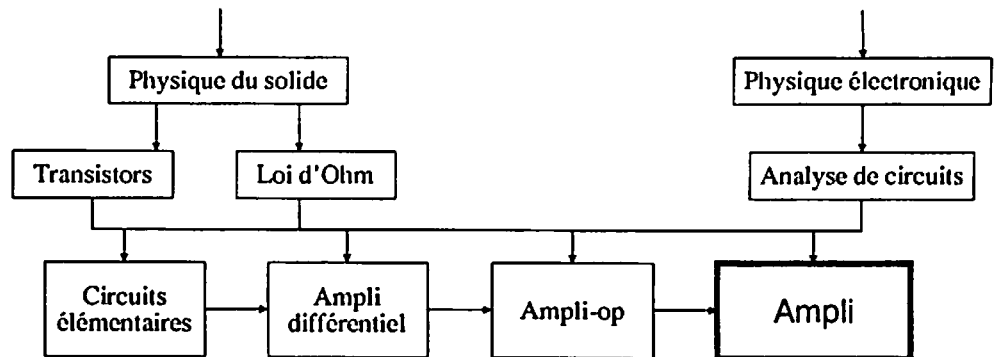


Fig. 2: Le cheminement qui est proposé à l'élève, dans l'approche traditionnelle, pour aborder l'étude du fonctionnement de l'amplificateur de la Fig. 1, est essentiellement un cheminement basé sur la science.

partir de circuits élémentaires comme le diviseur de tension jusqu'à l'amplificateur complet.

Plusieurs difficultés inhérentes à ce cheminement apparaissent clairement. Les voici en résumé :

- Les notions de mécanique quantique préalables à la physique du solide et les notions de théorie électromagnétique qui sous-tendent la physique électrique sont ignorées. Or, certains phénomènes sur lesquels on appuie les arguments sont de nature quantique.
- Le niveau de sophistication de la physique du solide et de la physique électrique dépasse de loin les possibilités des élèves sortant du secondaire.
- Le cheminement ne suit pas un ordre croissant de difficulté : au contraire, les notions les plus difficiles, les composants les plus difficiles et les circuits les plus difficiles sont souvent abordés les premiers.

En réalité, lorsqu'on demande à un élève sortant du secondaire d'assimiler des notions de physique du solide pour comprendre le fonctionnement du transistor, on se met immédiatement en situation d'échec. L'élève se rend compte, plus ou moins consciemment, qu'il n'a pas compris grand chose aux notions de physique des semiconducteurs, comme le niveau de Fermi par exemple. Ces notions n'ont *aucun sens* pour lui. Le problème ne vient pas du fait qu'il faille avoir assimilé la physique du solide pour comprendre le fonctionnement du transistor. Le problème prend son origine dans le fait que l'élève le croit, et il le croit parce qu'on utilise la physique des semiconducteurs comme introduction au transistor!

Le réflexe naturel de l'élève consiste alors à prendre le matériel comme seul point de repère, et le transistor ne devient pour lui qu'une simple puce enrobée de plastique et munie de trois pattes. Or, ce type de réaction correspond exactement aux constatations de Métioui & al. (1990).

L'approche traditionnelle est vouée à l'échec, parce qu'elle viole une règle de l'apprentissage : les notions que l'on enseigne ne font aucunement partie de la zone proximale de l'élève, c'est-à-dire de la zone immédiatement accessible pour de nouveaux apprentissages. Autrement dit, on leur demande d'apprendre à courir avant de marcher. De plus, les théories présentées font référence à des expériences de physique subtiles, basées sur des phénomènes non directement observables par l'élève en situation normale d'apprentissage.

Cela n'empêche pas l'approche traditionnelle d'être scientifiquement fondée : elle correspond à une vision de physicien ayant terminé sa formation. Si elle pose des difficultés insurmontables sur le plan didactique, que proposer d'autre ?

7.2. Dans l'approche système

Dans l'approche système, l'étude de l'amplificateur de la Fig. 1 arrive beaucoup plus tôt dans le cheminement, soit après une cinquantaine d'heures d'instruction (théorie et travaux pratiques compris). C'est un avantage important, parce qu'un circuit d'amplification comme celui de la Fig. 1 permet de se raccorder au vécu de l'élève, qui a déjà utilisé des amplificateurs audio.

Les bases, très légères mais solides, sont illustrées à la Fig. 3.

- La topologie des circuits, avec les notions de représentation schématique, de noeud et de branche, est ancrée sur des observations directes en laboratoire.
- La notion de courant dérive du concept plus général de débit, lui-même basé sur la notion mathématique de taux de variation. La loi de Kirchhoff sur les courants (LKC) en fait ressortir les attributs critiques.
- La notion de tension s'appuie sur le concept d'énergie. C'est le seul concept de physique qui est utilisé dans l'approche système, initialement. Il convient de supporter un minimum d'expérimentation préalable pour développer le concept d'énergie, car les élèves issus du secondaire font mal la distinction entre force, énergie et puissance. La loi de Kirchhoff sur les tensions (LKT) en fait ressortir les attributs critiques.
- Le modèle de la résistance (la loi d'Ohm) ainsi que le modèle de l'amplificateur opérationnel, que nous avons baptisé « ampli-op man », qui sont des relations courant-tension.

En appliquant la LKC, la LKT et les modèles résistance et ampli-op man à la topologie du circuit de la Fig. 1, on arrive très facilement à en comprendre le fonctionnement.

Le cheminement de type système est accessible au collégial, contrairement à celui de l'approche traditionnelle, et plus solide parce qu'il s'appuie sur des observations que l'apprenant peut faire. Il ne peut réaliser des expériences sur le dopage des semiconducteurs, mais il peut observer le comportement d'un amplificateur opérationnel.

7.3. Les modèles

Les *modèles fonctionnels* jouent un rôle central dans l'approche système : en effet, puisqu'on ne peut plus aborder la fonctionnalité d'un dispositif à partir de son fonctionnement interne, il faut envisager d'autres points de repère. Comme points de repère pour structurer les contenus, les modèles présentent d'immenses avantages (Brassard & al., 1992) par rapport au matériel : ils sont

- plus simples,
- moins diversifiés, et surtout,
- beaucoup plus durables.

Le mot « modèle » possède plusieurs acceptions. Nous l'utilisons ici dans le sens d'une *construction de l'esprit destinée à décrire, à expliquer et à prédire le comportement d'un dispositif dans une application donnée.*

Dans l'approche traditionnelle de l'électronique analogique, on utilise certains modèles, comme par exemple le modèle Thévenin/Norton, mais d'une manière générale, ces modèles jouent un rôle très secondaire par rapport au matériel. En électronique numérique, c'est le contraire : le modèle de bascule J-K est considéré par tout le monde comme bien plus important qu'une réalisation matérielle particulière de cette bascule (en LSTTL, HC ou ECL).

Nous utiliserons le mot « composante » pour désigner les modèles fondamentaux qui décrivent des comportements de base, comme la résistance, la capacité, l'inductance, l'amplificateur opérationnel. Leur description est donnée en termes fonctionnels, généralement une relation mathématique entre les formes d'ondes de courant et de tension. Les composantes ne correspondent pas nécessairement à un composant matériel; en général, un composant n'est pas représenté par une composante, mais bien par un modèle (parfois appelé « circuit équivalent ») faisant intervenir plusieurs composantes.

En électronique analogique, un modèle prend la forme d'une boîte noire possédant un certain nombre de bornes. Par exemple, la Fig. 4 représente un modèle à deux bornes. Dans ce cas, il y a un seul courant, I_1 et une seule tension, V_{12} . Un modèle à n bornes a exactement $n-1$ courants indépendants et $n-1$ tensions indépendantes (la LKC élimine un courant et la LKT élimine une tension).

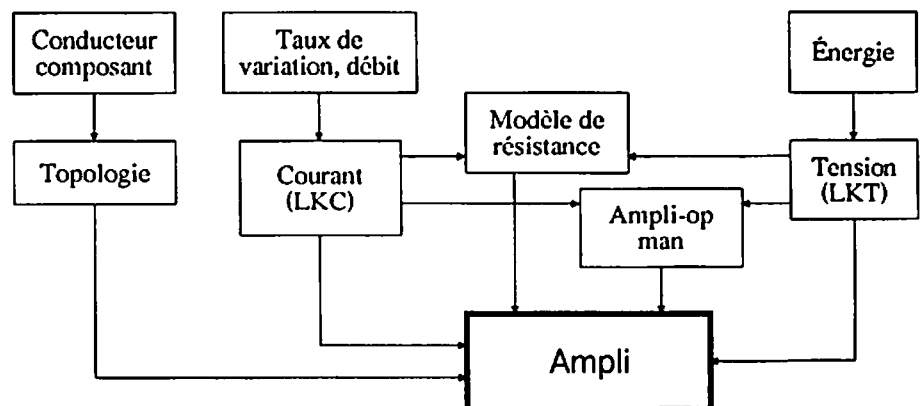


Fig. 3: Le cheminement qui est proposé à l'élève, dans l'approche système, pour aborder l'étude du fonctionnement de l'amplificateur de la Fig. 1.

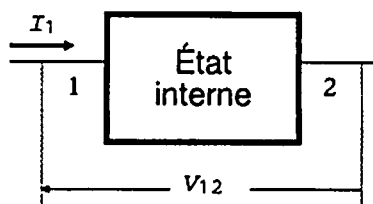


Fig. 4. Un modèle général à deux bornes.

Il est nécessaire de considérer un *état interne* pour décrire les modèles qui stockent de l'énergie ou de l'information, et dont le comportement dépend du temps (c'est-à-dire qui ont un effet de mémoire), par exemple la capacité ou le compteur. Cet état interne implique des variables continues et/ou discrètes.

7.4. Ampli-op man

Le modèle ampli-op man illustré sur la Fig. 5 se résume à ceci : Il existe deux potentiels de référence, la saturation positive V_M et la saturation négative V_m (ces deux potentiels sont, en pratique, juste en-deça des alimentations).

- Si le potentiel V_a est plus élevé que V_b , alors $V_C = V_M$;
Si le potentiel V_a est plus bas que V_b , alors $V_C = V_m$;
S'ils sont égaux, V_C se situe entre V_m et V_M .
- Les courants I_1 et I_2 sont nuls.

Une remarque s'impose ici : le modèle d'ampli-op man modélise l'amplificateur opérationnel *alimenté*, c'est-à-dire avec ses deux sources de tension V_{CC} et V_{EE} intégrées. Dans la

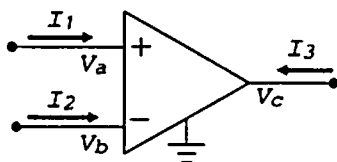


Fig. 5: Ampli-op man, un modèle d'amplificateur opérationnel (avec son alimentation intégrée).

mesure où ces sources de tension sont stabilisées, elles peuvent être considérées comme *privées* à l'amplificateur opérationnel, même si en pratique, elles sont partagées avec d'autres parties du circuit.

Le modèle ampli-op man ne présuppose pas la notion d'amplification, et il peut être utilisé sans invoquer le concept difficile de contre-réaction. Ainsi, il peut servir de base pour développer ces deux notions. À ce titre, il constitue un point d'entrée naturel pour tous les circuits dits actifs. Le transistor, dont le fonctionnement est un peu plus difficile à assimiler, peut être abordé immédiatement après.

8. UN SAUT ÉPISTÉMOLOGIQUE

Certains enseignants utilisent un modèle pour introduire l'amplificateur opérationnel, réalisant que c'est essentiel pour permettre aux techniciens d'interpréter la documentation technique des fabricants, rédigée dans l'approche système.

Mais le *cheminement* demeure souvent traditionnel. Parachuter un modèle systémique d'amplificateur opérationnel dans

la séquence d'apprentissage de la Fig. 2, c'est provoquer chez les élèves une rupture épistémologique. Le résultat, c'est que les professeurs et l'élève se retrouvent assis entre deux chaises, ce qui peut devenir très inconfortable. D'où le refrain : « j'ai essayé l'approche système, et ça ne marche pas mieux ».

La clé d'une approche système réussie, c'est l'absence de toutes les notions superflues (superflues dans le cadre de ce paradigme). Autrement dit, le succès de l'opération, le secret de la réussite, tiennent à ce dont *on évite de parler*.

Pour le professeur, abandonner l'approche traditionnelle représente un *risque* considérable. Pendant quelques années, il sera tenté d'utiliser les arguments traditionnels, qui n'ont aucune signification dans l'approche système. La transition est difficile, parce qu'elle ne peut se faire dans une continuité : il existe, entre deux paradigmes, un *saut épistémologique*.

9. LES FONDEMENTS

Quels sont, dans un contexte en constante mutation, les points de repère stables, sur lesquels on peut s'ancrer, et à partir desquels on pourra transférer ses connaissances et ses habiletés, se renouveler? Parmi ces points de repères, lesquels sont pertinents pour un technicien? Dans tout ce qu'on leur enseigne, qu'est-ce qui servira à nos élèves pendant toute leur vie, et qu'est-ce qui sera déjà périmé dès leur premier emploi?

La familiarité avec un certain type de matériel ne peut plus jouer de rôle stabilisateur dans le contexte actuel. En effet, c'est précisément *le matériel qui est en constante mutation*. Devant une situation où nous ne savons même pas quel type de matériel électronique existera dans cinq ans, il apparaît évident qu'il faut éviter de faire jouer au matériel un rôle structurant. C'est là une première difficulté pour l'approche traditionnelle, qui, nous l'avons vu, utilise précisément le matériel pour structurer les apprentissages.

Les fondements de l'approche système ne sont pas les fondements matériels ni scientifiques traditionnels. Dans l'approche système, la science n'est pas ignorée : elle intervient plus tard dans le processus, avec la physique des composants. Compte tenu du peu de temps disponible, certains concepts scientifiques ne pourront cependant être abordés qu'au niveau de la vulgarisation, et cela, il faut s'en accommoder. Un technicien n'est pas (et ne devrait pas être) un physicien.

Si le matériel est éphémère et certains concepts scientifiques inaccessibles, les *concepts*, les *principes* et les *modèles* sur lesquels se fonde l'approche système survivent depuis des décennies et survivront vraisemblablement pour toute la carrière d'un technicien. Au niveau des *concepts*, citons :

- des concepts technologiques généraux :
système, signal, mesure, contre-réaction, régulation...
- des concepts mathématiques :
constante, variable, fonction, opération, proportionnalité, taux de variation (dérivée), accumulation (intégrale), moyenne, comportement exponentiel...
- des concepts scientifiques :
énergie, puissance...

- des concepts liés aux circuits :
conducteur, noeud, branche, courant, tension, signal...
- des concepts informatiques :
donnée, structure de donnée, liste, fichier, itération...

En ce qui concerne les *principes*, nous avons les lois de Kirchhoff, qui dérivent des lois de conservation de la charge électrique et de l'énergie.

Le lecteur appréciera le fait que tous ces concepts et principes sont avec nous, essentiellement inchangés, depuis plus de cent ans (sauf pour certains concepts informatiques, qui sont plus récents), et qu'il est peu probable qu'ils tombent en désuétude dans un avenir immédiat. Nous avons également mentionné les *modèles*, dont il est question plus haut.

Pour conclure cette section, remarquons que dans ce nouveau contexte, les mathématiques sont fatalement appelées à jouer un rôle beaucoup plus important que par le passé. L'approche système est directement tributaire des mathématiques, car les modèles qui en constituent l'épine dorsale sont, en réalité, des modèles mathématiques.

10. LES CARACTÉRISTIQUES SYSTÉMIQUES

Depuis le début de l'implantation de l'approche système à Lionel-Groulx, en 1985, nous avons relevé les différents aspects qui distinguent l'approche système de l'approche traditionnelle. Nous les résumons ici dans trois tableaux.

Le premier tableau, « Considérations didactiques d'ordre général », relève les éléments applicables à n'importe quelle technique physique; ces éléments s'appliquent intégralement à l'électronique numérique, en particulier.

Considérations didactiques d'ordre général

	App. traditionnelle	Approche système
Organisa-tion.	L'organisation des contenus est basée sur le matériel.	Les contenus sont organisés à partir des modèles fonctionnels.
Ordre.	L'ordre d'apparition des composants se conforme à l'historique de leur apparition sur le marché.	L'ordre d'apparition des modèles respecte une gradation des difficultés d'apprentissage.
Modèles.	Les modèles sont peu utilisés, mal identifiés et considérés comme de vulgaires outils de calcul.	Les modèles constituent les points de repère essentiels, auxquels les fabricants de matériel tentent de se conformer le mieux possible.
Compré-hension.	L'explication du fonctionnement interne des dispositifs est considérée comme la base de leur compréhension et préalable à leur utilisation technique.	Les modèles fonctionnels forment la base de la compréhension, l'étude du fonctionnement interne n'intervient que plus tard, et pour des considérations pratiques.

Considérations didactiques d'ordre général (suite)

	App. traditionnelle	Approche système
Base scien-tifique.	Les connaissances scientifiques de base (magnétisme, théorie des semiconducteurs...) sont considérées comme précieuses.	On exploite la cohérence interne de la discipline en partant d'observations et du vécu de l'apprenant. Les liens avec la physique, souvent difficiles, sont traités ultérieurement.
Mathéma-tiques.	Les difficultés d'ordre mathématique sont contournées systématiquement, parfois au prix de détours considérables. (Même le comportement logarithmique du transistor, pourtant très simple, est soigneusement évité.)	On ne peut éviter les difficultés mathématiques, à cause de la nature relativement abstraite des modèles. (Même les équations différentielles sont abordées de front, à un niveau correspondant aux besoins techniques.)

Le second tableau traite plus précisément de la didactique de l'analogique.

Didactique de l'électronique analogique

	App. traditionnelle	Approche système
Structures.	Les composants sont beaucoup plus importants que le réseau de conducteurs.	Le réseau de conducteurs est fondamental; insistance sur les structures topologiques, en particulier le noeud et la branche.
Courants et ten-sions.	Les courants et les tensions sont considérés comme des attributs des composants.	Les tensions sont associées aux paires de noeuds et les courants aux conducteurs ou aux branches.
Classifica-tion.	Les dispositifs sont classés d'après leur niveau d'intégration (composant discret, circuit intégré...).	Les modèles sont classés d'après leurs propriétés fondamentales (dépendance vis-à-vis du temps, linéarité...).
C.C. et C.A.	La démarche classique consiste à étudier d'abord les circuits à courant continu (C.C.), puis les circuits linéaires excités en ondes sinusoïdales (improprement appelés circuits à courant alternatif ou C.A.). On apporte peu d'attention aux formes d'ondes quelconques.	Presque toute l'attention porte sur les formes d'ondes quelconques; les ondes sinusoïdales sont considérées comme un cas particulier intéressant mais d'importance relative.
Loi d'Ohm.	La loi d'Ohm est présentée comme une loi de la physique (universelle et immuable).	La loi d'Ohm ne représente qu'un cas particulier du modèle linéaire.

Didactique de l'électronique analogique (suite)

	App. traditionnelle	Approche système
Linéarité.	L'insistance porte sur les circuits linéaires; les circuits non-linéaires sont traités soit en les linéarisant, dans une démarche de type petit-signal, ou carrément en commutation.	L'importance du modèle linéaire est reconnue, mais il reste un modèle parmi d'autres. Le modèle logarithmique du transistor bipolaire et de la diode sont également à l'honneur.
Sources.	La source de tension est favorisée par rapport à la source de courant, qui est pratiquement ignorée.	La source de courant est considérée comme aussi importante que la source de tension.
Circuits équivalents	Les circuits équivalents (Thévenin, Norton...) sont considérés comme des alternatives de circuits.	Les circuits équivalents sont considérés comme des représentations schématiques de relations mathématiques entre courants et tensions.

Finalement, l'expérimentation de Lionel-Groulx, partagée depuis 1991 par André-Laurendeau, touche également la pédagogie. Le troisième tableau regroupe les éléments qui relèvent de la pédagogie, c'est-à-dire les éléments qui sont plutôt de l'ordre des moyens.

En effet, il serait difficile d'imaginer l'approche système dans le cadre de la pédagogie de l'approche traditionnelle. Le fait de modifier la didactique en profondeur ne peut pas ne pas avoir de répercussion sur la pédagogie. C'est pourquoi nous présentons quelques éléments de pédagogie, dans cet article plutôt centré sur la didactique.

Aspects pédagogiques

	App. traditionnelle	Approche système
Objets manipulés.	On évite le plus possible les manipulations directes des courants et des tensions.	On manipule directement les courants et les tensions dans tous les problèmes.
Lois de Kirchhoff.	Les lois de Kirchhoff ne sont traitées que pour des cas particuliers.	Considérées comme d'une importance primordiale, les lois de Kirchhoff sont appliquées dans toute leur généralité (LKC sur une surface fermée et LKT sur une suite de noeuds).
Circuits étudiés.	Une étude approfondie est faite de quelques circuits, en particulier des circuits d'amplificateurs, choisis pour leur importance pratique (à une certaine époque!).	Quelques circuits étudiés en profondeur sont choisis principalement pour leur richesse au niveau pédagogique.

Aspects pédagogiques (suite)

	App. traditionnelle	Approche système
Résolution de circuits.	Les démarches de résolution de circuits linéaires proposées aux élèves sont mieux adaptées à un ordinateur qu'à un humain.	La démarche de résolution de problèmes véhiculée favorise la familiarisation avec le circuit.
Signes.	La loi d'Ohm est vue sans insistance sur les signes respectifs du courant et de la tension.	Une attention toute particulière est accordée aux signes dans la définition des modèles résistance, capacité et inductance.
Puissance.	Le calcul de la puissance est couvert pour des cas particuliers seulement (principalement pour la résistance).	La puissance est définie et calculée pour une composante quelconque et une forme d'onde quelconque.
Formes d'ondes.	Les sinusoides sont les plus exploitées, à cause de leur importance pratique dans les applications traditionnelles de l'électrotechnique.	Les ondes constituées de segments de droites sont favorisées, à cause de leur généralité et de leur importance pratique dans les applications récentes.
Rigueur.	Confusion entre composant et composante, entre schéma théorique, diagramme schématique et diagramme de câblage.	Distinction explicite et rigoureuse entre composant et composante, entre schéma théorique, diagramme schématique et diagramme de câblage.

Une comparaison entre les deux approches doit se faire sur des critères spécifiques. Voici donc les critères qui ont été retenus.

11. CRITÈRES DE COMPARAISON

Nous avons dressé une liste de critères, sans tenter d'en établir l'importance relative. En réalité, nous pensons que tous ces critères sont essentiels, une faiblesse dans l'un d'entre eux étant de nature à mettre en péril la qualité des apprentissages.

- Le respect de la cohérence interne de la discipline.
- Le respect des bases scientifiques sous-jacentes.
- L'adéquation à la clientèle visée (respect de ses caractéristiques, en particulier de son niveau de préparation).
- Son économie.
- La pertinence des contenus.
- L'adéquation avec la pratique dans le milieu de travail.
- La performance de la structure conceptuelle proposée, dans l'accomplissement des tâches de nature technique.
- Sa généralité, les possibilités de transfert ou d'application à des disciplines connexes.
- La satisfaction des exigences du marché du travail.
- La qualité des représentations qui en résultent.

L'approche système mise strictement sur la *cohérence interne* de la discipline : en effet, à partir des lois de Kirchhoff et de modèles fonctionnels, il est possible de prédire le comportement de n'importe quel dispositif électrique ou électronique, dans la mesure où il tombe sous la juridiction de la théorie des circuits (c'est-à-dire que les régions de l'espace où l'effet des champs électriques et magnétiques devient important demeurent circonscrites). On obtient ainsi un système didactique consistant et autonome qui permet de rendre compte d'un très grand nombre d'observations expérimentales avec un strict minimum d'hypothèses de départ.

L'approche traditionnelle ne jouit pas d'une aussi bonne cohérence, parce que la théorie des circuits y est inextricablement liée à la physique des composants. En revanche, dans l'approche traditionnelle, les *bases scientifiques* de la discipline sont respectées.

Le troisième critère, l'*adéquation à la clientèle*, vient cependant détruire, du moins en ce qui concerne l'élève, ce présumé respect des bases scientifiques. Tel que discuté plus haut, ce dernier s'avère totalement incapable d'assimiler les notions de physique sous-jacentes au fonctionnement des composants (physique de l'électron et physique du solide), ni la théorie électromagnétique qui est à la base de la théorie des circuits, à ce stade précis de son apprentissage. Pédagogiquement, il est inutile d'insister sur l'impact négatif que peut avoir, pour la motivation d'un élève et pour sa réussite scolaire, la présentation de contenus incompréhensibles pour lui, contenus qu'il interprétera (à tort) comme essentiels à la poursuite ultérieure de ses études. L'approche système, en remettant à plus tard l'étude des fondements scientifiques, favorise une bien meilleure gradation des difficultés d'apprentissage.

Sur la base des lois de Kirchhoff et de quelques modèles de base, on arrive à ramasser rapidement tout l'essentiel de l'électronique analogique, dans l'approche système. C'est précisément ce critère d'efficacité ou d'*économie de moyens* qui est le plus décisif, car dans l'approche traditionnelle, l'électronique analogique fait figure de ramassis hétéroclite de plus en plus volumineux de cas particuliers. Or, les contenus à la hausse s'accroissent fort mal des pondérations à la baisse.

L'approche système a également permis d'améliorer la *pertinence des contenus*. En principe, on aurait pu remanier les contenus tout en restant dans l'approche traditionnelle; cependant, parce que l'industrie à adopté l'approche système, les nouveaux contenus sont beaucoup plus faciles à intégrer dans l'approche système que dans l'approche traditionnelle.

Quant à la structure conceptuelle véhiculée par l'approche système, elle offre une excellente *performance* à des utilisateurs de circuits, à des concepteurs de circuits, et à des techniciens responsables de l'installation, du dépannage et de la réparation. Pour les utilisateurs (et tous les techniciens sont de grands utilisateurs), c'est l'aspect encapsulation qui est le plus utile. Pour le travail de conception, c'est la rigueur dans la définition du modèle fonctionnel qui est la plus significative. Finalement, le technicien responsable de l'entretien de systèmes peut bénéficier grandement de la vision en couches successives de l'approche système, et une maîtrise des modèles peut lui permettre une meilleure compréhension de la signification des caractéristiques d'un dispositif (à sélectionner pour une installation, par exemple).

Certains des concepts clés de l'approche système sont directement utilisables ou à tout le moins *transférables* dans les domaines connexes comme l'hydraulique et le logiciel. La plus grande mathématisation de l'approche système y contribue, mais ce n'est pas le seul facteur.

Quant à la *satisfaction du marché du travail*, on ne peut que souligner l'insistance avec laquelle les employeurs ont réclamé l'adoption d'une approche système, lors des dix analyses de situation de travail qui ont marqué le coup d'envoi de la révision de programme, en août et septembre 1990.

La didactique système a été élaborée récemment, en pleine connaissance d'un certain nombre de *représentations erronées* qui avaient cours dans l'approche traditionnelle. On s'attend donc en droit de s'attendre à une amélioration majeure à ce chapitre. Cependant, le danger existe d'avoir créé d'autres représentations erronées, et à cet effet, il faudra attendre encore quelques années pour évaluer sérieusement la situation. Pour l'heure, il semble que les élèves formés dans l'approche système depuis 1985 s'en portent très bien.

12. DIFFICULTÉS POTENTIELLES

À l'examen des trois tableaux qui précèdent, il ressort que l'approche système est plus abstraite, plus mathématisée que l'approche traditionnelle. L'élève y manipule en priorité des courants et des tensions, plutôt que des composants. Les modèles théoriques y jouent un rôle prépondérant.

Ce niveau plus élevé d'abstraction est rendu inévitable par la nécessité de couvrir un nombre grandissant de phénomènes et de dispositifs, dont la complexité et la diversité ne cessent d'augmenter. On pourrait craindre que ce niveau plus élevé d'abstraction décourage les élèves. En réalité, ce danger est très réel, et pour le garder dans des proportions acceptables, il est indispensable de prévoir une expérimentation efficace et diversifiée, qui permette de familiariser le futur technicien avec l'environnement physique et d'ancrer les apprentissages dans le concret, afin qu'ils prennent tout leur sens. Nos élèves se révèlent relativement habiles dans la manipulation d'abstractions, dans la mesure où celles-ci sont significatives. Dans l'approche système, une assimilation convenable des concepts de courant et de tension est possible dès la deuxième session, ce qui permet de tirer bon parti des sessions subséquentes.

L'approche en couches successives peut aussi résulter en un traitement superficiel, si la méthode est mal appliquée.

13. RÉSULTATS DE L'EXPÉRIMENTATION

L'approche système implantée à Lionel-Groulx depuis 1985, par l'un des auteurs et L. Beaulieu, a donné lieu à une certaine évaluation, par le biais de l'enquête Métioui. Dans la version finale de ce rapport, à paraître en 1992, les résultats de Lionel-Groulx qui manquaient dans la version 2 seront inclus. Sans entrer dans les détails, on peut affirmer que les représentations des élèves qui ont suivi l'approche système sont complètement différentes de celles des autres élèves. L'amélioration dans la performance au niveau des tests écrit et oral est considérable : quantitativement, il s'agit d'un ordre de grandeur.

L'expérience d'André-Laurendeau date de septembre 1991. Deux des auteurs, appuyés par C. Buono et R. Brassard, y ont apporté leur propre contribution. Malgré quelques difficultés, le résultat est très concluant. On peut affirmer que l'approche système n'est pas un phénomène isolé, tributaire d'un ou deux individus, mais qu'il est possible de l'implanter avec succès dans d'autres institutions. En même temps, nous avons appris à ne pas sous-estimer la difficulté de l'opération.

14. CONCLUSION

Les cinq programmes des Technologies du Génie électrique de 1992 ont été conçus pour faciliter le virage systémique. Il convient de remarquer que ces nouveaux programmes, rédigés par compétences, laissent toute la marge de manoeuvre nécessaire à l'enseignant, et n'imposent aucune pédagogie particulière. Toutefois, les contraintes liées à l'économie (de temps) ont joué de telle manière que le découpage des compétences dans les nouveaux programmes est plus directement compatible avec l'approche système qu'avec l'approche traditionnelle. Le virage, pour ceux qui désirent le prendre, s'en trouvera donc facilité d'autant.

À la lumière de l'analyse qui précède, il apparaît indispensable d'adopter à brève échéance une nouvelle didactique de l'enseignement de l'électronique analogique au collégial professionnel. L'approche système telle que décrite ici ne constitue probablement pas la seule et unique possibilité, mais elle permet d'intégrer l'analogique et le numérique dans une même vision cohérente, et elle s'inscrit naturellement dans un courant systémique beaucoup plus vaste.

Cette *approche système* est présentement à un stade expérimental avancé, mais elle est encore loin d'être figée. Il est certain que les collègues qui commenceront l'expérimentation en septembre 1992 l'enrichiront de nouvelles dimensions.

Finalement, mentionnons que tout changement d'envergure comporte des risques. La gestion sereine de ce risque est sans doute le plus grand problème auquel nous aurons à faire face.

BIBLIOGRAPHIE

- Boylestad, R.L. (1979), *Analyse de circuits, introduction*, Éditions du Renouveau pédagogique.
- Boylestad, R.L. & Nashelsky, L. (1981), *Semi-conducteurs et amplificateurs*, Éditions du Renouveau pédagogique.
- Brassard, C. (1990), *L'approche système en électronique*, rapport interne, Institut d'ordinique, Collège Lionel-Groulx.
- Brassard, C., Métioui, A. & Levasseur, J. (1992), Modèles utilisés dans une première approche des circuits électriques, *Compte-rendus du Congrès canadien de l'éducation en ingénierie*, U. Laval, Québec, 24-26 mai 1992.
- Closset, J.L. & Viennot, L. (1984), Contribution à l'étude du raisonnement naturel en physique, *Communication Information* 6, pp. 399-420.
- Cohen, R., Eylon, B. & Ganiel, U. (1983), Potential Difference and Current in Simple Electric Circuits, *American J. of Physics*, 51(5) pp. 407-412.
- De Rosnay, J. (1975), *Le microscope*, Editions du Seuil.
- Dertouzos, M.L., Lester R.K., & Solow, R.M. (1989), *Made in America*, The M.I.T. Press.
- Driver, R. (1981), Pupil's Alternative Frameworks in Science, *European Journal of Science Education*, 3 (1), pp. 93-101.
- Dupin, J.J., & Josuah, S. (1987), Conceptions of French Pupils Concerning Electric Circuits : Structure and Evolution, *Journal of Research in Science Teaching*, 24 (9), pp. 791-806.
- Laroche, D. (1988), *Profil scolaire des étudiants inscrits en électrotechnique au collégial*, Service du développement des programmes, Direction générale de l'enseignement collégial.
- Laroche, D., Tremblay, C., Nérout, J.P. & Brassard, C. (1990), *Rapport d'orientation pour la révision des programmes du champ professionnel de l'électrotechnique*, Service du développement des programmes, Direction générale de l'enseignement collégial.
- Lavoie, M., Levasseur, J., Brassard, C. & Métioui, A. (1991a), Représentations des élèves du collégial professionnel sur la source de courant : le « modèle de l'autoroute », La didactique des sciences appliquées en enseignement technique et professionnel, *Actes du Colloque RDF-ACFAS*, Sherbrooke, Qc., 22-23 mai 1991, pp. 69-82.
- Lavoie, M., Métioui, A., Levasseur, J. & Brassard, C. (1991b), Conceptual Representations of Electrical Circuits, *Frontiers in Education*, Proc. of the 21st Conf., Purdue University, West Lafayette, IN., 21-24 sept. 1991.
- Malvino, A.P. (1980), *Principes d'électronique*, McGraw-Hill.
- Métioui, A. (1990), La persistance des représentations spontanées des élèves en physique, *Revue canadienne de l'éducation*, 15 (2), pp. 183-190.
- Métioui, A., Lavoie, M., Levasseur, J. & Brassard, C. (1990), *L'assimilation des concepts de base de la théorie des circuits chez les élèves du collégial professionnel*, Rapport préparé à l'intention du Service du développement des programmes de la DGEC, MESS.
- Métioui, A., Brassard, C. & Levasseur, J. (1992a), Conceptions constructivistes et rôle des représentations conceptuelles, *Compte-rendus du 60ième Congrès de l'ACFAS*, Université de Montréal, 11-15 mai 1992.
- Métioui, A., Brassard, C. & Levasseur, J. (1992b), A Systemic approach to Electrical Circuits, *Proceedings of the World Conference on Engineering Education*, Portsmouth, UK, 20-25 sept. 1992.
- Métioui, A., Brassard, C., Levasseur, J. & Lavoie, M. (1992c), Représentations et apprentissage des circuits électriques, *Biennale de l'éducation et de la formation*, UNESCO, Paris, 27-30 avril 1992.
- Métioui, A., Brassard, C., Levasseur, J. & Lavoie, M. (1993), Review of the International Literature Related to the Persistence of Students' Unfounded Beliefs about Electrical Circuits : the Case of Ohm's Law, à paraître.
- Rohrer, R.A. (1990), Taking Circuits Seriously, *IEEE Proc. on Circuits and Devices*, Juillet 1990, pp. 27-31.
- Shipstone, D.M. (1984), A study of children's understanding of electricity in simple DC circuits, *European Journal of Science Education*, 6 (2), pp.185-198.