



Institut Suisse de Pédagogie pour la Formation Professionnelle



Mémoire Professionnel

Electricité et
Analogie Hydraulique

Jean-François Pochon
jean-francois.pochon@cpnv.ch

Centre Professionnel du Nord Vaudois
Avril 2003

cpnv
Centre professionnel du Nord vaudois
Filière d'électronique

Table des matières :

TABLE DES MATIÈRES :	2
REMERCIEMENTS :	5
MÉMOIRE PROFESSIONNEL	6
Introduction :	6
Question de recherche :	6
Projet :	6
Hypothèses :	7
Justification :	7
Motivation pour le sujet :	7
Réflexions :	8
CONCEPTIONS DES GRANDEURS ÉLECTRIQUES	9
Conception	9
Représentations :	9
Choix des termes :	9
Une histoire d'éléphant :	10
Conceptions-obstacles :	10
Apprentissage :	11
Hypothèse constructiviste :	11
Expérimentation et confrontation :	12
Un circuit électrique est un éléphant :	13
Rendre la vue aux aveugles :	14
Exemples, analogies, métaphores :	14
Question de l'âge des étudiants :	14
Analogie modélisante :	15
Modèles :	16
Définition du champ d'application :	16
Modèle « Textuel complet » :	18
Remarque :	18
Modèle « Pompe et réservoir » :	19
Modèle « chaîne de vélo » :	20
Modèle « hydraulique simple » :	20
Modèle « transport de charbon » :	20
Analogie du camion de charbon (Coal-truck analogy) :	20
Modèle « hydraulique partiel » :	21
Modèle « du train » :	22
Modèle « chaîne humaine » :	22
Modèle « ronde » :	23
Modèle du « réservoir avec tuyau » :	24
Modèle « Surfeur » :	25
Autres modèles :	30
Modèle « rivière » :	30

Modèle de « la foule »:	30
Modèle « Atmosphérique »:	30
Critique des analogies :	31
Modèle hydraulique :	32
Reproches faits à ce modèle:	32
Résumé des objections:	33
Réalisation :	34
LE MODÈLE	35
Circuit électrique :	35
Circuit hydraulique :	35
Résistance :	36
Résistance à sable :	38
Source :	39
Conducteurs :	39
Connexions :	40
Différence de pression (voltmètre) :	41
Vanne (Interrupteur) :	41
Diode :	42
Source alternative :	42
Point de masse :	43
Condensateur :	44
Inductance :	45
Tableau récapitulatif :	47
Résistance :	47
Condensateur :	47
Self :	47
Commentaire sur la récapitulation :	48
Champ d'application :	48
Présentation de la maquette	49
Circuits à réaliser	50
Circuit ouvert, visualisation de la tension :	50
Circuit série, une seule résistance :	51
Circuit série deux résistances :	52
Circuit parallèle deux résistances :	52
Circuit RC série :	53
Circuit RL série :	54
Extension vers l'alternatif :	56
Questionnaire d'évaluation	57
Analogie hydraulique :	57
Présentation de l'analogie:	57
Manipulation par les élèves :	57
Intérêt des éléments de la maquette :	57
Documentation d'accompagnement :	57
Résultat du questionnaire d'évaluation :	59
Analogie	60
Présentation :	60
Manipulation :	61

Eléments de la maquette : _____	61
Apport à l'électricité : _____	62
Remarques manuscrites : _____	62
Documents papier (transparents) : _____	64
Circuits résistifs _____	73
Circuit RC série _____	74
Circuit RL série. _____	75
 CONCLUSION _____	 76
Modèle hydraulique: _____	76
Réalisation pratique : _____	76
Travail de mémoire : _____	77
Perspectives : _____	77
Coût : _____	77
Annexe I : Questionnaire sur l'électricité _____	78
Analyse des résultats électricité _____	82
Analogies recueillies par le questionnaire _____	85
Mise en évidence des analogies utilisées en fonction du résultat obtenu (critère d'efficacité) _____	87
Annexe II : Dimensionnement de la turbine (inductance) : _____	89
Lexique : _____	92
Bibliographie : _____	94

Remerciements :

Je tiens à remercier les gens qui ont rendu possible ce modeste travail, c'est pour quoi j'adresse mes plus vifs remerciements aux collègues étudiants de l'ISFPF qui ont participé à ce travail, mais aussi à mes différents professeurs pour leurs bons conseils, à M Jean-Daniel Monod pour sa lecture attentive et sa foi dans l'idée saugrenue de la création d'une maquette aquatique pour des circuits électriques, et à mon école le CPNV à Yverdon par l'intermédiaire de mon doyen Pierre Erbeau pour son soutien logistique.

Mais surtout, je voudrais associer ma petite famille qui a supporté un père et mari absent pendant de longues soirées et quelques semaines de vacances.

Merci Françoise, Lucien, Antoine et Armand, et merci à Jeanne, née au milieu du mémoire pour son calme et sa bonne composition.

Mémoire professionnel

Introduction :

Je travaille au sein d'une école professionnelle qui forme des apprentis dans les domaines de l'électricité.

Ces apprentis sont des automaticiens dont la formation englobe les métiers d'électriciens et de mécanicien avec de l'automate programmable comme connaissance spécifique.

J'enseigne également aux électroniciens qui ont une formation en électricité, électronique et microcontrôleur.

Au cours de ma pratique d'enseignement, j'ai utilisé comme la plupart de mes collègues les équivalences classiques électricité-mécanique en ce qui concerne les circuits résistifs pour les premières et deuxièmes années.

Il m'est apparu que les moyens utilisés pour présenter cette « aide à la compréhension » n'étaient que très sommaires alors que pour certains élèves, l'équivalence mécanique (hydraulique) contribue à mettre en place durablement les notions élémentaires mais primordiales de tension-courant. J'ai remarqué que dans la plupart des cas on présente une analogie qui n'a pas été pensée comme outil de formation mais on mentionne telle ou telle partie de l'analogie liée au sujet en cours, sans l'expliquer en tant qu'objet didactique cohérent, ni expliciter les limites de celle-ci.

D'autre part, les éléments tels que résistances, condensateurs et inductances se laissent aisément représenter dans leur version mécanique, et, excepté pour la résistance, ces éléments équivalents ne sont que rarement mis à contribution.

Des professeurs à qui j'ai posé la question, la plupart m'on répondu ne pas avoir pensé à utiliser une analogie pour ces composants, d'autres refusent de les utiliser pour rester dans le seul discours électrique (question de religion).

Question de recherche :

Déterminer chez les étudiants l'influence d'une métaphore telle que l'analogie hydraulique sur les représentations des circuits et des grandeurs électriques.

Projet :

C'est pourquoi je propose de concevoir divers documents et objets permettant de mieux utiliser les équivalences hydrauliques dans l'enseignement de l'électrotechnique et l'électronique puis de les valider par l'expérimentation dans des classes du CPNV.

Hypothèses :

On peut créer une analogie hydraulique cohérente pour un circuit électrique comportant une source de tension continue et des éléments tels que :

- Conducteurs
- Résistances
- Interrupteurs
- Condensateurs
- Inductances
- Diodes
- Ampèremètres
- Voltmètres.

L'utilisation de cette analogie permet aux élèves de progresser dans leur connaissance de l'électrotechnique.

Cette utilisation sera efficace si l'on montre l'analogie comme un système cohérent dont on indique clairement les limites.

Justification :

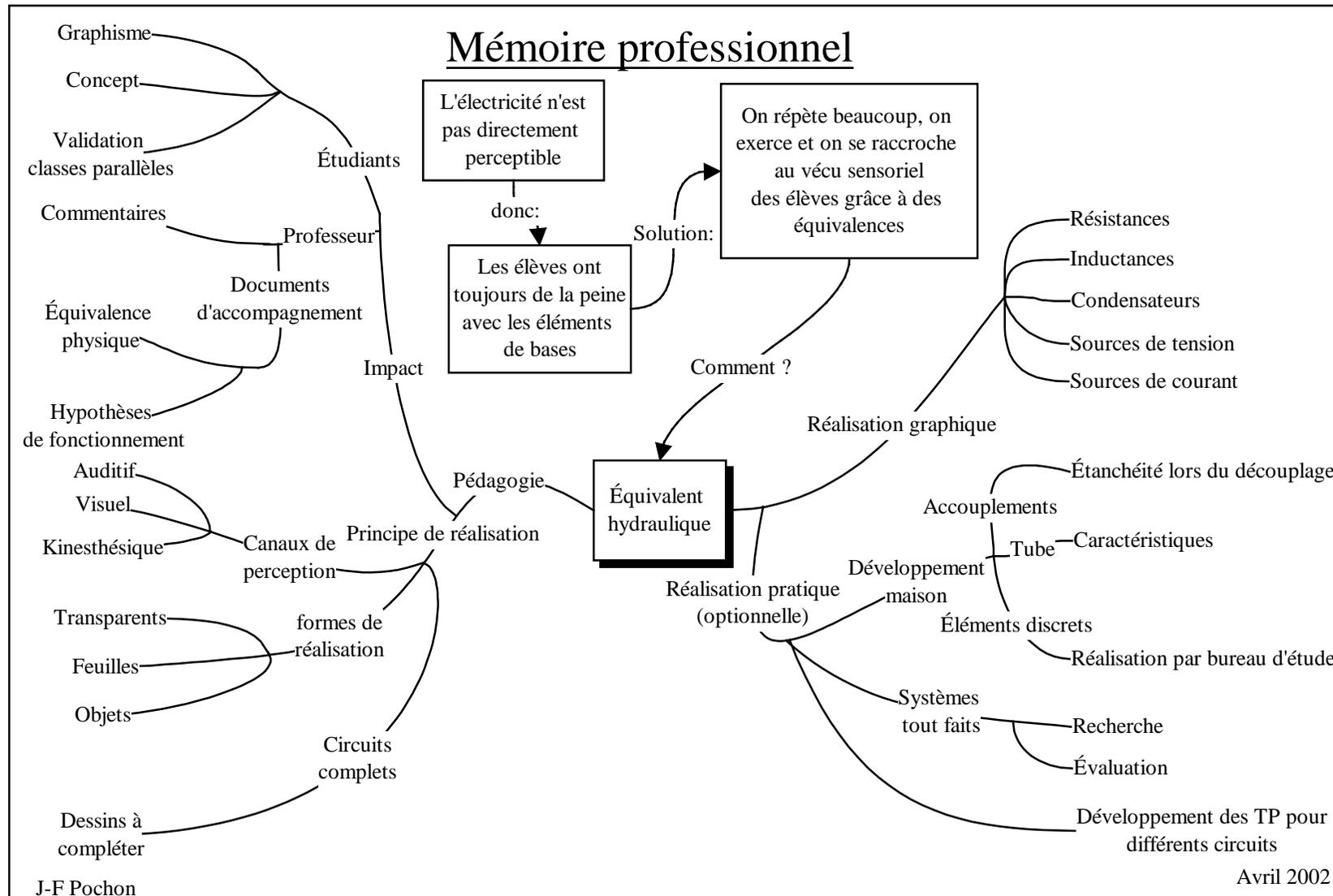
Cette approche a déjà fait des merveilles dans mes classes et les documents quelque peu rudimentaires utilisés jusqu'alors demandent à être améliorés. De plus, j'ai ressenti des réserves de la part de mes collègues pour l'utilisation d'une analogie plus élaborée. Elles sont dues selon moi en partie au manque de validation et « d'enrobage marketing » des éléments que j'utilise (images de synthèse) ainsi qu'à un manque de théorisation des éléments en question tant sur le plan physique que pédagogique.

Les circuits trouvés sur le marché fonctionnant avec de l'eau sont d'une qualité qui interdit leur utilisation en classe. Les sources de pression sont difficiles à régler, les mesures de pression se font à l'aide de tubes verticaux ouverts (aucun rapport avec la version électrique) et la mise en œuvre est automatiquement accompagnée de l'inondation de tout ou partie du sol de la classe. Un prolongement de mon travail pourrait être de réaliser physiquement des maquettes de manipulation comportant divers circuits.

Motivation pour le sujet :

Ce sujet me tient à cœur tant il est vrai que depuis mon école d'ingénieur, je regrette que l'on n'utilise pas plus ces modèles pour visualiser, au sens propre, le comportement des éléments de base de l'électrotechnique.

Réflexions :



Conceptions des grandeurs électriques

Conception

Une conception est définie comme « Action d'élaborer quelque chose dans son esprit, résultat de cette action » (Larousse 1993) ou « Pour les apprenants le seul outil que le cerveau est capable de produire pour interpréter le monde qui les entoure » (Giordan 1993). L'élaboration de conceptions est un premier pas vers une symbolisation du réel afin de se l'approprier pour ensuite, avoir une emprise sur les choses.

Nous utilisons tous les jours des conceptions pour aborder les problèmes physiques. Pour s'en convaincre « Tentez de trouver une force dans la nature, ramenez-la moi et peignez-la en vert » (Robardet/Guillaud 1997 p. 109) personne ne pourra y parvenir car il s'agit, quand on parle de force d'une représentation mentale d'un phénomène, et pas du phénomène lui-même.

Représentations :

Une représentation est « Le contenu structuré de la pensée d'un sujet concernant un phénomène ou, une classe de phénomènes » (Joshua/Dupin 1989 p. 30). Une représentation est un ensemble de conceptions ayant trait à un sujet et mises en relation entre elles. C'est ainsi que nous élaborons nos modèles internes, qui peuvent avoir deux fonctions essentielles :

La première fonction est l'interprétation de phénomènes. On utilise ici le modèle pour comprendre, organiser et mettre en relations les grandeurs en jeu. L'autre fonction étant la prédiction, les objets de pensée réagissent alors comme leurs homologues réels, nous pouvons les solliciter et le comportement de celui-ci préfigure alors des réactions de celui-là.

La représentation d'un phénomène est construite à partir de l'expérience de tous les jours. Pour un objet d'étude de la physique, les cours donnés à l'école tentent de compléter la représentation qu'a chaque élève de ce phénomène par des expériences vécues par lui ou relatées(*) par le professeur.

En arrivant à l'école (professionnelle) l'esprit des élèves n'est pas vierge, loin s'en faut et il a selon Bachelard, « l'âge de ses préjugés » (Zimmermann-Asta 2002 p.18)

L'utilisation correcte de cette représentation, de ce modèle, est ensuite vérifiée lors d'exercices et enfin, la représentation est utilisée systématiquement dans le cours. A tel point que si l'on demande à un étudiant en physique ce qu'est une force, elle sera plus facilement décrite comme étant un vecteur ayant une direction, une amplitude et un sens que comme « Toute cause capable de déformer un objet, d'en modifier l'état de repos ou de mouvement. » (Larousse)

Choix des termes :

Ne voulant pas rentrer dans une polémique sémantique à propos du choix des termes, j'ai une préférence toute personnelle pour le terme de « représentation » qui, il me semble, rend mieux compte de l'image que l'on se fait d'un phénomène que « conception » qui pour moi regroupe un ensemble plus large d'objets de pensée. Il n'en demeure pas moins que pour des raisons rédactionnelles, le terme de conception pourra apparaître dans mon travail, en particulier pour parler des « conceptions-obstacles » et suivant en cela plusieurs auteurs dont Mme Zimmermann-Asta (2002) .

(*)Pour trancher entre ces deux options (vécue ou relatée), je vous suggère d'expliquer que la porte d'un fourneau allumé est brûlante à un enfant. Passez le temps qu'il faut, tous mes enfants sont allés se brûler les doigts une fois au moins. Ce qui me fait dire que : Rien, jamais, ne remplace l'expérience personnelle.

Une histoire d'éléphant :

Comme se plaisent à répéter les chantres de la PNL, nous avons chacun notre carte du monde où chaque mot, chaque phrase évoque des représentations qui nous sont propre.

J'évoquerai pour illustrer cette affirmation la célèbre histoire des 5 aveugles qui entrent pour la première fois en contact avec un éléphant et cherchent à décrire à leurs amis ce qu'est, pour eux, cet étrange animal.

Le premier aveugle, qui n'avait touché que l'oreille de la gigantesque bête, commença ainsi : "Cet animal ressemble à une sorte de tapis volant. Son corps est mince et plat, un peu rugueux, et il s'agite dans le vent lorsqu'on le touche."

Le second aveugle, qui avait touché la trompe, démenti son collègue : "Mais non. C'est un long serpent qui se dresse tout droit et a beaucoup de force, comme un boa."

Le troisième aveugle, qui avait touché une patte, dit à son tour : "Vous vous trompez tous les deux. Il s'agit d'un arbre au tronc puissant et à l'écorce rude."

Le quatrième aveugle, qui avait touché les flancs, répondit : "Vous êtes tous des fous ou des menteurs. Ce qu'on appelle un éléphant est en réalité une montagne."

Enfin, le cinquième aveugle, qui avait touché la queue, s'exclama : "Soyez un peu sérieux. L'éléphant n'est ni un tapis, ni un boa, ni un arbre, ni une montagne. C'est un simple pinceau!"

Adapté par Édouard Brasey d'après un comte cambodgien relaté par Adhémar Leclère (1912)

Tous ont une représentation différente du concept « éléphant » mais en fait aucun des protagonistes de cette histoire n'a véritablement tort. Les aveugles n'ont qu'une expérience partielle de l'éléphant et cette expérience ne suffit pas à se faire une idée complète de l'animal. Chacun se réfère ici à son vécu et aux objets qu'il a coutume de côtoyer, les représentations utilisées à bon ou mauvais escient pour rendre compte d'un phénomène nouveau sont celles des expériences passées et il faudra un important travail pour que chaque aveugle renonce à son interprétation partielle, à la certitude d'avoir bien senti la bête, au profit de la création d'une nouvelle représentation plus globale.

On peut reconnaître ici les problèmes posés par les conceptions existantes que l'on a tant de peine à modifier et connues sous le doux nom de conception-obstacle.

Conceptions-obstacles :

Une conception-obstacle est un « Modèle explicatif sous-jacent très cohérent qui résiste à tout changement », toutes les conceptions initiales de nos aveugles sont des conceptions-obstacle, soit des « conceptions initiales qui n'évoluent pas si on ne leur fait pas subir de traitement particulier (...) il faudra donc essayer de créer une dissonance qui attaque le noyau dur de la conception » (Zimmermann-Asta 2002 p.18).

On constate ainsi que « Ce n'est pas l'ignorance qui fait obstacle mais une connaissance déjà là » (Bachelard 1938 cité dans Zimmermann-Asta 2002 p. 59)

Apprentissage :

On pourrait imaginer différentes stratégies pour compléter la représentation de l'éléphant :

- Faire le tour de la bête, tâter d'autres parties de son corps et ainsi compléter leur perception, ce qui permettrait de construire un modèle plus semblable à l'original.
- Faire d'autres expériences, sonores, olfactives, monter dessus et se rendre compte que cet éléphant bouge, tâter un petit éléphant dont il est plus facile de faire le tour, rendre la vue aux aveugles, etc.

Un autre moyen indirect serait de confronter les avis des aveugles, mais il faut pour cela un gros travail d'imagination et de diplomatie en plus d'une bonne dose de confiance en l'autre pour créer un modèle qui intégrerait toutes les conceptions tirées du contact avec l'animal.

Hypothèse constructiviste :

Nous allons ici nous appuyer sur les notions de « savoir construit » pour identifier les différentes caractéristiques de l'acquisition du savoir, car comme les aveugles, nous découvrons à tâtons notre environnement et cherchons à relier les expériences nouvelles à celles que nous avons vécues. A ce propos, lorsque l'on parle de lien, je dirai encore que la structuration des connaissances est primordiale dans le cadre de la physique et que l'on doit veiller à l'établissement correct des liens entre concepts lors de l'acquisition de nouvelles notions.

On peut résumer comme le font Josha/Dupin 1989 p. 29-30 les règles de base de l'apprentissage :

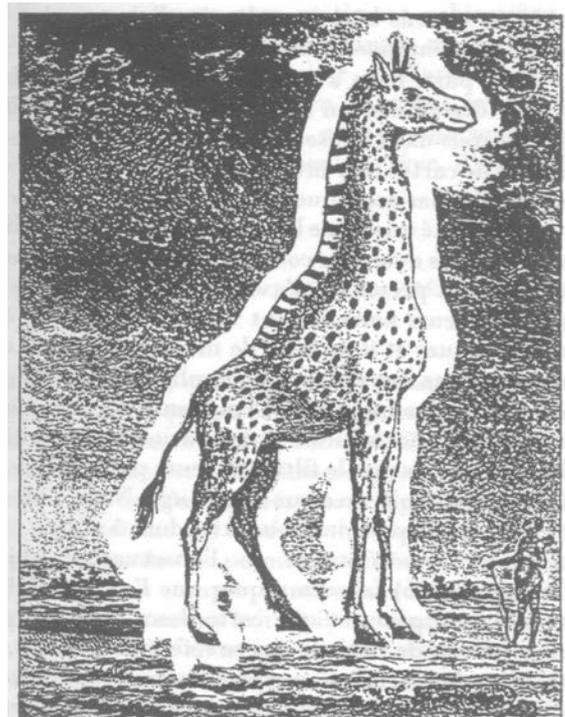
- Le sujet construit ses connaissances physiques par une interaction active avec l'environnement
- Le comportement observable du sujet face à une situation problème est conditionné par le type de connaissances du sujet et par leur structuration.
- La production d'un sujet ne dépend pas uniquement de la structure interne de ses connaissances mais aussi du type spécifique de la situation problème.
- Les objets conceptuels visés par la didactique de la physique sont des objets complexes qui ne se laissent pas aisément réduire en schèmes comportementaux ou cognitifs de base.

Les girafes aussi...

Les cognitiens constructivistes comme Varela (1989) vont même plus loin en refusant l'idée que le cerveau recevrait une information qu'il traiterait ensuite seul. Ils font au contraire remarquer que l'observation suppose une reconstruction de la réalité et que cette reconstruction ne peut être qu'un phénomène social (s'appuyant sur le vécu individuel mais surtout communautaire du sujet).

L'exemple donné est celui de la girafe décrite dans l'histoire naturelle de Buffon. L'auteur a représenté l'animal avec une tête et des oreilles d'âne, une crinière de zèbre, un corps et des sabots de cheval. (...) Nous voyons bien à quel point l'observation fut ici guidée par des présupposés culturels.

(Robardet/Guillaud 1997 p. 29).



Expérimentation et confrontation :

Nos conceptions sont validées ou modifiées lors de la confrontation avec le monde réel, c'est ainsi que nous les élaborons par comparaisons successives avec leurs objets dans des conditions à chaque fois différentes.

De ce point de vue, le fait que les conditions d'observation soient diversifiées est primordial, un aveugle qui ferait le tour de l'éléphant en touchant tour à tour les 4 pieds serait conforté dans son avis sur la question et il serait plus difficile alors de lui faire admettre que son modèle n'est pas juste.

Comme pour l'éléphant, plus les conditions de confrontations seront variées, plus notre modèle interne sera robuste et résistera aux interrogations les plus diverses.

Exercices de renforcement...

La tendance est souvent de demander aux élèves d'exécuter plusieurs exercices du même type pour être sûr que « c'est acquis », parfois sans se demander quelle notion nous avons renforcée ici. Faire exécuter une multitude d'exercices qui auraient trait au même aspect d'un phénomène, qui l'observeraient sous le même angle, c'est prendre le risque d'enraciner une mauvaise conception dont l'arrachage sera d'autant plus douloureux que les racines étaient profondes.

Un circuit électrique est un éléphant :

Et nous sommes tous des aveugles.

Il ne nous est pas possible d'appréhender ce qu'il se passe dans un circuit électrique par nos seuls sens. Nous sommes obligés de nous munir de prothèses sensibles (appareils de mesure) qui vont nous dévoiler à chaque fois un aspect de la réalité sans avoir jamais la possibilité de « voir » cet étrange animal d'un seul coup d'œil.

Bien sûr, comme m'a dit un de mes collègues, « Tu vas te donner beaucoup de peine pour expliquer quelque chose qu'ils comprendraient facilement s'ils réfléchissaient un peu... » La réalité est hélas beaucoup plus compliquée, j'en veux pour preuve les exercices basiques que j'ai donné à faire à plusieurs classes et qui ont montré que les notions de base (au maximum deux sources en courant continu et deux résistances) n'étaient, et loin s'en faut, pas assurées lorsqu'on les interroge sous des angles un tant soit peu aigus.

Le réflexe habituel d'une grande partie de nos élèves est de chercher des lettres de grandeurs qu'ils pourraient retrouver dans leur formulaire. Quoi de plus sécurisant de retrouver dans un exercice I, R, à la suite de quoi il est si simple de poser $U=R \cdot I$, et de trouver une réponse. Demander ensuite ce qui a été calculé apparaît comme la plus offusquante des questions, où l'on s'aperçoit qu'en dehors des questions balisées et routinières se cachent des lacunes, voire une incompréhension totale du phénomène calculé et une bien piètre idée de ce qu'il se passe là, juste devant leur nez.

Ce constat fait, la question se pose de savoir quelle stratégie adopter pour permettre à nos élèves d'élaborer leurs conceptions en les testant sous les angles les plus variés, de leur donner une vue d'ensemble des phénomènes électrodynamiques et ceci le plus rapidement possible pour éviter un enracinement de modèles erronés ou incomplets.

Rendre la vue aux aveugles :

C'est l'option que j'ai choisie, cela paraît peut-être incongru, mais quelle meilleure méthode pour appréhender un éléphant que de voir sa silhouette, la couleur de sa peau, le voir bouger, distinguer ses défenses, le voir remuer sa trompe, etc.

Et c'est ainsi que je vais montrer à mes élèves des électrons circuler dans un circuit électrique, une différence de tension augmenter aux bornes d'une résistance, des charges s'accumuler dans un condensateur ou du flux magnétique se stocker dans une bobine. Ils le verront de leurs yeux, pourront toucher le circuit et modifier les valeurs des composants pour voir évoluer en direct la valeur des différentes grandeurs.

Exemples, analogies, métaphores :

Plusieurs options s'offrent à nous pour réaliser cette visualisation et il faut faire la distinction entre un exemple et une analogie. Tous deux visent à rendre la nouveauté plus familière à l'apprenant. Cependant, à la différence de l'analogie qui est une comparaison entre deux domaines distincts, l'exemple, lui, vise plutôt à illustrer le nouveau concept par un cas ou une application concrète. Ainsi, un exemple d'électricité statique serait l'éclair. (Benoit Gauthier 1994)

Il existe aussi une différence entre une métaphore et une analogie. Toutes deux sont une comparaison et servent à souligner des similitudes entre deux domaines. Cependant, là où l'analogie compare explicitement les structures de deux domaines en identifiant les parties de chacune des structures auxquelles elle se rapporte (...), une métaphore compare de manière implicite, en faisant ressortir les caractéristiques qui ne sont pas similaires entre les deux domaines. Le but de la métaphore est de surprendre l'esprit et, par-là, d'inciter la personne à rechercher les similitudes existant entre les deux domaines. (Benoit Gauthier 1994) Bien que la métaphore soit séduisante, on ne peut confiner aussi facilement qu'on le prétend des métaphores dans le seul règne de l'expression. Qu'on le veuille ou non, les métaphores séduisent la raison. Ce sont des images particulières et lointaines qui deviennent insensiblement des schémas généraux. (...) Le danger des métaphores immédiates pour la formation de l'esprit scientifique, c'est qu'elles ne sont pas toujours des images qui passent; elles poussent une pensée autonome ; elles tendent à se compléter, à s'achever dans le règne de l'image. (Gaston Bachelard dans Astolfi, Darot, Ginsburger-Vogel, Toussaint 1997 p. 442)

L'analogie est en définitive l'instrument le mieux adapté pour mettre en place des conceptions nouvelles, et/ou modifier les anciennes. Elle montre en effet sans détour l'enchaînement des grandeurs et évite les mauvaises interprétations. Elle évite également l'introduction de conceptions biaisées que peut générer une métaphore dans un champ d'application électrique difficile.

Suivant Bachelard, j'ajouterais qu'une analogie que l'on offre à nos élèves peut avoir une vie très longue. Il est fort possible que cette durée excède le cadre de notre école et l'analogie va suivre nos élèves dans leur métier ou la suite de leurs études. Elle doit donc être mûrement étudiée et répondre à l'identique du domaine réel pour une vaste étendue de sollicitations.

Question de l'âge des étudiants :

On trouve dans la littérature, basée sur des études langagières, une valeur de l'âge moyen à partir duquel des enfants seraient capable d'effectuer les opérations mentales nécessaires à la compréhension des analogies. (Astolfi & co 1997 p. 443)

L'âge en question est situé vers 10 ans et si cette objection est fondée, elle ne l'est plus pour nos élèves qui entrent dans notre école à 16 ans.

Analogie modélisante :

Le terme Analogies modélisantes est un terme rencontré dans l'ouvrage « Représentations et modélisations » de (Josha/Dupin 1989) qui caractérise une analogie utilisée comme modèle de comportement des grandeurs physiques, de support à la discussion en classe et, par là, au conflit cognitif recherché.

Elle doit selon ces auteurs répondre aux exigences suivantes :

- Doit remplir une fonction figurative et de concrétisation forte vis-à-vis du domaine étudié qui n'aura d'effet sur les conceptions que si elle entretient également une grande quantité de relations isomorphe avec celui-ci.
- Doit avoir un fonctionnement plausible pour l'étudiant.
- Doit être plus simple à appréhender que le système initial, compte tenu de la base de connaissance préalable de l'étudiant.
- Cette analogie doit être une version épurée, débarrassée au maximum des détails et particularités non significatives pour son utilisation.
- La rentabilité de l'effort d'acquisition d'un modèle par les élèves sera d'autant plus élevée que l'analogie aura un solide isomorphisme vis-à-vis du système initial et pourra dès lors être utilisée dans un nombre élevé de situations d'apprentissage.

On retrouve d'ailleurs les mêmes éléments sous la plume d'autres auteurs :

On constate que l'intérêt d'un modèle réside en premier lieu dans sa simplicité, son économie et son grand pouvoir explicatif en référence à un champ expérimental aussi vaste que possible. (Robardet/Guillaud 1997 p. 116)

Un des facteurs importants devant guider le choix d'une analogie est son degré de similarité avec le domaine-cible (c'est-à-dire qu'on doit s'assurer qu'il y a le plus grand nombre possible de relations similaires entre le domaine-analogie et le domaine-cible). Plus une analogie comporte de relations similaires, plus elle est bénéfique à l'apprenant. (Benoit Gauthier 1994)

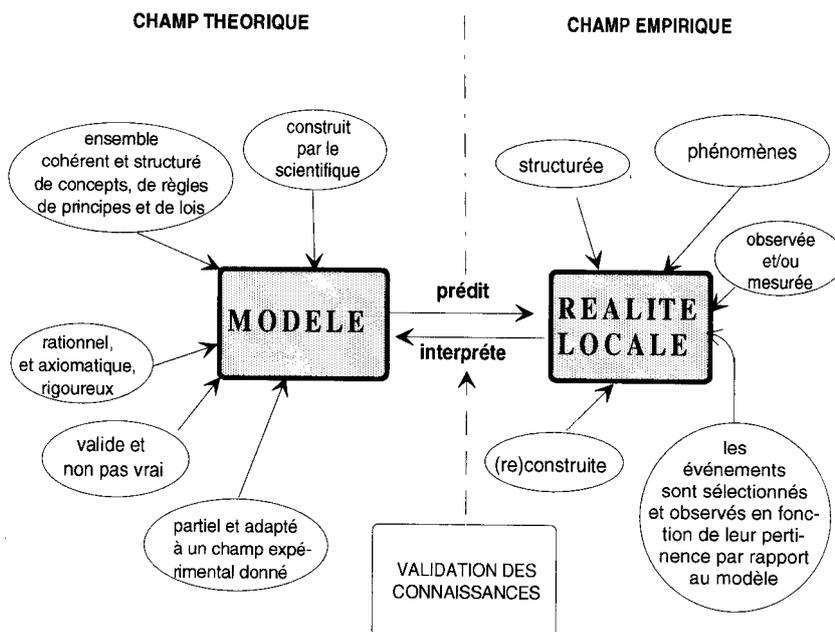
J'utiliserai le terme « modèle » ou « analogie » dans la suite de ce texte, suivant en cela les dénominations des documents de référence utilisés, quand bien même la définition de « l'analogie modélisante » définit plus précisément l'objet de mon étude.

Modèles :

Pour arriver à mes fins, je vais donc m'appuyer sur un modèle qui met en évidence les liens entre les grandeurs électriques.

Un modèle physique se distingue d'une théorie physique en ce sens que le modèle est lié à un champ d'expérimentation qui délimite les phénomènes mis en évidence par le modèle.

Voici, tiré de « Eléments de didactique des sciences » (Robardet/Guillaud 1997 p. 105) un schéma qui illustre les liens et particularités d'un modèle et de la réalité empirique qu'il représente.



Les éléments principaux mis en évidence ici sont la double utilisation prédictive et interprétative du modèle ainsi que la délimitation de l'application du modèle dans le champ empirique (réel) aussi bien que dans le champ théorique (modèle).

Définition du champ d'application :

Le modèle que je désire créer doit en premier lieu décrire les relations entre les grandeurs de base de l'électricité soit courant, tension, résistance en courant continu. Tout l'enseignement en électricité repose sur ces notions qui, on le voit dans les résultats de mon questionnaire ne sont pas toujours maîtrisées.

Une première extension s'attachera à décrire le comportement des éléments de base de l'électrotechnique soit condensateur et inductance, plus la diode, facile à modéliser.

On peut imaginer une seconde extension qui permette de mettre en évidence le comportement des circuits alternatifs, mais je doute que cela soit possible dans le temps imparti pour la réalisation de ce mémoire.

On voit que la prétention du modèle à créer est immense mais je suis convaincu de la pertinence de sa constitution qui rendra, j'en suis certain, de grands services à mes élèves et j'espère également aux élèves de mes collègues.

Les modèles :

Voici quelques exemples de modèles pour l'électrocinétique, glanés ça et là au cours de mes pérégrinations littéraires, au cours de ma formation et sur internet. Toutes n'ont pas la même valeur, le même public-cible et la même prétention. Il s'agit là d'un catalogue quelque peu hétéroclite, qui a pourtant le mérite de contenir des éléments utilisés en pratique par des enseignants, et qui me permettra ensuite d'élaborer un modèle de synthèse adapté au mieux au public des écoles professionnelles en épousant au plus près les préceptes énoncés plus haut.

Ces quelques exemples donnent une idée de la variété des options choisies par les enseignants et conséquemment, des conceptions initiales de nos élèves. Tous nos élèves ont en effet déjà eu un cours d'initiation durant lequel les phénomènes électriques leur ont été présentés.

Modèle « Textuel complet » :

Tiré de : « Éléments de didactique des sciences physiques » (Robardet/Guillaud 1997 p. 122)

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 (résistance) et dans lesquels la résistance interne du générateur est négligée.

Relations sémantiques :

Un conducteur électrique est représenté comme un matériau poreux rempli de particules pouvant se déplacer à l'intérieur.

Un circuit électrique est représenté par une suite fermée d'éléments conducteurs communiquant les uns avec les autres (les particules qui remplissent 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 « plus » et y entrent par le pôle « moins ». Les autres éléments traversés par les particules sont appelés récepteurs.

En un point du circuit, l'intensité I du courant (en Ampères A) est la grandeur qui représente la valeur du débit des particules en mouvement.

La force électromotrice (FEM) E du générateur (en volt V) est la grandeur qui représente le pouvoir du générateur de mettre et de maintenir les particules 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.

Relations syntaxiques :

Tout circuit est complètement rempli de particules, on ne peut ni en ajouter, ni en retirer, ni en détruire : leur nombre total est constant pour un circuit donné.

Les particules présentes dans un circuit représentent un ensemble incompressible. Elles ne peuvent que circuler dans le circuit mais pas s'accumuler. Ainsi, l'intensité du courant est la même en tout points d'une chaîne d'éléments montés en série.

La résistance équivalente à 2 résistances montées en série est égale à la somme de leurs résistances respectives. $R_{eq} = R1 + R2$

La résistance équivalente à 2 résistances montées en parallèle est donnée par la règle :

$$R_{eq} = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2}$$

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 résistances par la relation : $I = E / R_{eq}$

Remarque :

Ce modèle, bien que n'étant qu'un énoncé textuel des caractéristiques d'un circuit électrique, est complet pour le champ concerné (première étape de mon modèle) et va me servir de base pour la critique des modèles suivants.

Modèle « bille et tube » :

Tiré du « traité d'électricité pour radio amateur »

Auteur : Denis Auquebon 2001 (<http://perso.wanadoo.fr/f6crp/elec/cc/ui.htm>)

Electricité :

Prenons une analogie simple : supposons que vous soyez assez habile pour faire tenir en équilibre une bille dans un tube. Si vous maintenez le tube bien horizontal, la bille est immobile, à peine frémissez-vous que la bille se met en mouvement, parallèlement vous observez que ce mouvement n'est possible que dans la mesure où vous inclinez le tube. Vous avez donc créé une différence de niveau pour mettre en mouvement la bille. En électricité, il en va de même, pour faire circuler des électrons (le courant) on a besoin de produire préalablement une différence de potentiel (la tension).



Tension :

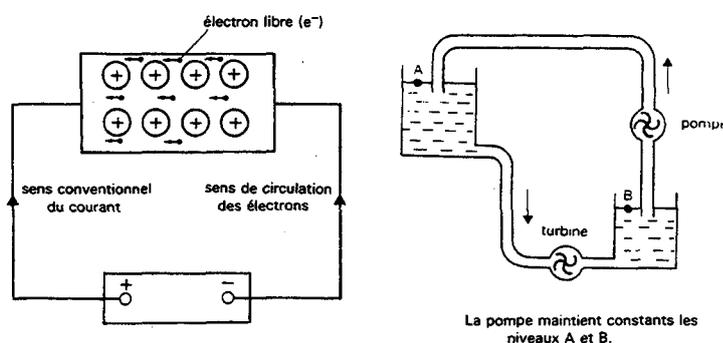
A l'accumulation de charges positives d'un côté et à l'accumulation de charges négatives de l'autre. Un pôle est chargé positivement, le +, l'autre négativement, le -. Tant que ces deux pôles ne sont pas réunis, aucun courant ne circule.

Courant :

Imaginons un tuyau dans lequel circule de l'eau, si nous voulons mesurer le débit (pour la facturation par exemple) nous devons insérer un dispositif qui mesure le volume d'eau qui traverse à un point donné et en une seconde notre tuyau. Il en est de même pour le courant, nous allons comptabiliser les charges électriques qui circulent dans un endroit du circuit et ce en une seconde.

Modèle « Pompe et réservoir »

Tiré de : « Éléments de didactique des sciences physiques » (Robardet/Guillaud 1997 p. 101)



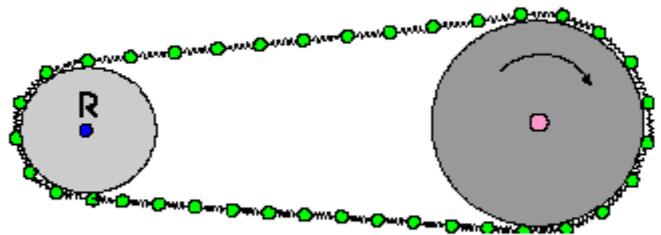
Tiré de : Serveur de ressources pour l'enseignement secondaire non confessionnel en Communauté française de Belgique (<http://www.agers.cfwb.be/pedag/ressources/D049/anaelec.htm>)

Auteur : Jean Delire 1993

Modèle « chaîne de vélo »

Analogie mécanique :

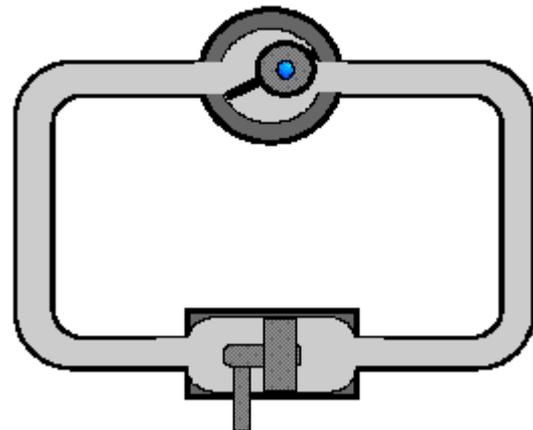
Dans une analogie mécanique, on compare un circuit électrique à une chaîne de vélo (fermée) qui relie le plateau du pédalier au pignon de la roue arrière. Nous avons représenté une chaîne un peu particulière. Elle est composée de « particules » reliées par des petits ressorts. Le grand disque représente le plateau. Les maillons de la chaîne jouent le même rôle que les porteurs de charges du circuit électrique. Ils ont présents dans la chaîne. Ce n'est pas le pédalier qui les apporte.



Modèle « hydraulique simple » :

Analogie Hydraulique

On pourrait comparer le circuit électrique à un circuit hydraulique fermé, contenant un liquide de l'huile par exemple) et composé d'une pompe, de tuyaux et d'un moteur hydraulique jouant le rôle de récepteur. Aucune fuite n'est possible, la masse totale l'huile reste enfermée dans le circuit. Les particules d'huile jouent le même rôle que les porteurs de charges du circuit électrique. Elles sont présente dans le circuit. Ce n'est pas la pompe qui les apporte.



Modèle « transport de charbon »

Tirée de : « A study of science-in-the-making as students generate an analogy for electricity » (<http://www.education.uts.edu.au/lsrcd/research/cos951.htm>)

Auteur : Marc Cosgrove 1995

Analogie du camion de charbon (Coal-truck analogy)

Un train (une suite) de camions se suivant les uns les autres, transporte du charbon. Chaque camion verse le charbon au lieu de consommation, puis il retourne chercher un nouveau chargement au lieu d'extraction. La résistance est vue comme une route étroite qui ne permet pas de passer facilement.

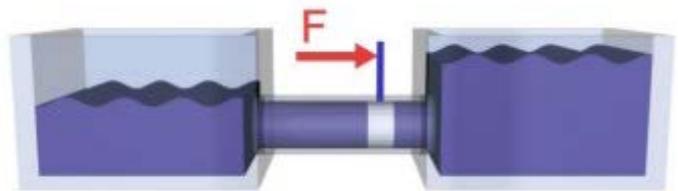
Modèle « hydraulique partiel » :

Tiré de : « La théorie de Maxwell et des oscillations herziennes »

Auteur : Henri Poincaré 1899

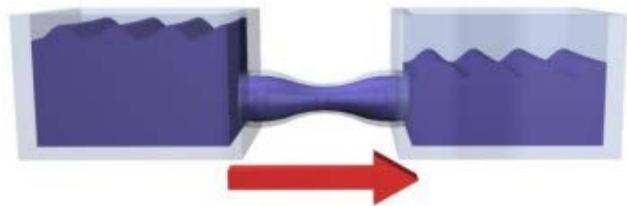
Condensateur :

Supposons, par exemple, que nos deux réservoirs soient réunis par un tube cylindrique horizontal de large section, et que dans ce tube se meuve un piston. Quand on poussera le piston de façon à refouler l'eau dans celui des réservoirs où le niveau est le plus élevé, on dépensera du travail ; si on laisse au contraire le piston obéir aux pressions qui s'exercent sur ses deux faces, il se déplacera de telle sorte que les niveaux tendent à s'égaliser, et l'énergie emmagasinée dans les réservoirs sera partiellement restituée.



Résistance :

Mettons nos deux réservoirs en communication par un tube horizontal, long et de section étroite. L'eau s'écoulera lentement par ce tube, et le débit sera d'autant plus grand que la différence de niveau sera plus grande, la section plus large, le tube plus court. En d'autres termes, la résistance du tube qui est due aux frottements internes, croîtra avec sa longueur et décroîtra quand sa section augmentera.



Inductance :

Prenons un régulateur à force centrifuge (composé de deux sphères suspendues chacune par une tige qui peuvent s'écarter de l'axe de rotation). Pour augmenter la vitesse angulaire du régulateur, et par suite sa force vive, il faut lui fournir du travail, et surmonter par conséquent une résistance que l'on appelle son inertie. De même, augmenter l'intensité des courants, c'est augmenter la force vive de l'éther(*) ; et il faudra, pour le faire, fournir du travail et surmonter une résistance, qui n'est autre chose que l'inertie de l'éther, et que l'on appelle l'induction.



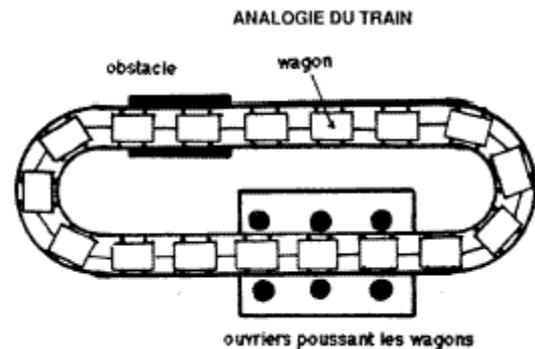
(*) L'éther était, selon les anciens physiciens, un fluide impondérable, subtil et élastique supportant la propagation des ondes lumineuses notamment et dans lequel était stocké l'énergie d'une self, cette éther était une tentative de modéliser, entre autre, la notion actuelle de flux magnétique

Modèle « du train » :

Tirée de (Josha/Dupin 1989 p.110)

Analogie du train

Sans qu'il s'agisse là d'autre chose que d'un choix d'opportunité, nous nous sommes attachés à présenter une forme particulière de l'analogie mécanique. Celle de « l'analogie du train ». Dans ce cas très simplifié, le problème revient en fait à celui d'un objet soumis à une force suffisante pour combattre les frottements ; le mouvement se fait alors à vitesse uniforme « limite ». Ce type de correspondance est implicitement mis à contribution dans certaines analogies comme celle de la chaîne de vélo, proposée par Closset (1983) mais il y a en fait une rupture dans l'analogie qui est l'introduction d'un circuit fermé. Or ce circuit fermé n'est pas obligatoirement impliqué par l'analogie ; il est un apport supplémentaire qui, on le verra plus loin vient perturber la pertinence de l'analogie.



Cependant, à partir du moment où l'on a recours à une analogie, il ne paraît pas possible qu'elle n'exhibe pas d'emblée ces éléments, si importants, que sont les notions de circuit fermé et de transport de matière le long de ce circuit fermé, et ceci en particulier pour les élèves débutants.

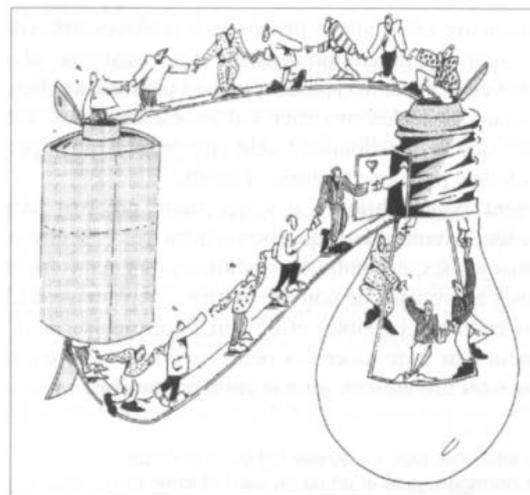
Modèle « chaîne humaine » :

Tiré de « Des idées pour apprendre »

Auteurs : André Giordan, Françoise Guichard, Jack Guichard Ed. Delagrave 2001

Ce modèle est cité dans l'ouvrage, plus comme illustration que réellement comme modèle, dans le sens que l'on ne trouve aucune légende à cette image autre que « dessin support ».

Il n'en demeure pas moins que l'on a voulu utiliser une représentation de circuit électrique pour améliorer la compréhension et je vois mal comment les élèves pourraient ne pas l'adopter comme modèle ensuite.



Modèle « ronde » :

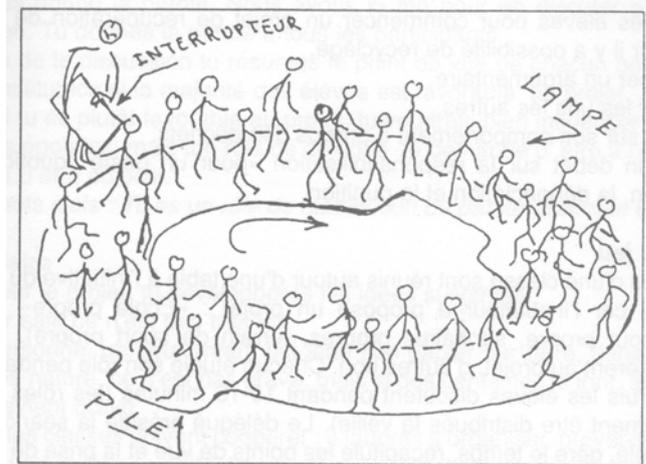
Tiré de « Des idées pour apprendre »

Auteurs : André Giordan, Françoise Guichard, Jack Guichard Ed. Delagrave 2001

La ronde du courant électrique.

La représentation la plus fréquente du courant électrique renforcée par le langage parle de courant donc de circulation d'un fluide. Dès lors, le générateur ou la pile produisent lorsqu'on ferme le circuit « une substance nouvelle ». Mais quand le courant ne passe pas, il semble aux élèves « qu'il n'y a plus rien dans le fil électrique ».

Une ronde permet d'expérimenter en groupe avec son propre corps le passage du courant électrique. On trace sur le sol de la cour de l'école un chemin fermé qui symbolise le circuit électrique. Les élèves se répartissent uniformément sur toute la surface du chemin. Ils représentent les charges électriques. Le maître met une barrière en un point du circuit pour simuler la coupure du circuit par un interrupteur. Les élèves s'agitent sur place en permanence. Cette agitation désordonnée symbolise celle des particules électriques. Lors de la coupure du circuit, ils s'agitent sur place, mais quand le circuit est fermé, ils continuent de s'agiter en se déplaçant tous et lentement dans un sens. Le rétrécissement correspond à une résistance électrique et provoque une bousculade pour les enfants, ce qui correspond au choc des électrons qui provoquent l'échauffement de la résistance.



Modèle du « réservoir avec tuyau » :

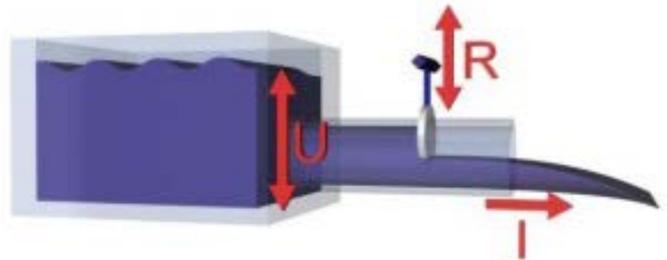
Tiré de : « Pour quelques ampères de plus », les aventures d'Anselme Lanturlu

Auteur : Jean-Pierre Petit <http://www.jp-petit.com/>

Un réservoir est rempli d'eau, à sa base, un trou auquel est raccordé un tuyau est percé, qui permet à l'eau de sortir. Un robinet permet de laisser passer, de freiner ou d'empêcher l'eau de passer.

La hauteur d'eau est la tension, le débit d'eau dans le tuyau le courant et le robinet représente une résistance variable sur le circuit.

Une variante existe, qui remplace le réservoir par un barrage.



Modèle « Surfeur » :

Créé par : Christian Lachapelle 1998

(<http://mendeleiev.cyberscol.qc.ca/carrefour/theorie/planche.html>) et complétée par

Christian Fumeaux Prof. D'électricité à l'école de Sion c.fumeaux@bluewin.ch

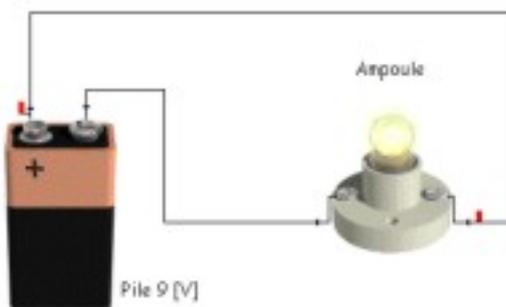
Analogie : surf et circuits électriques

Je me suis creusé la tête pour trouver un moyen de te présenter, d'une façon simple, les éléments de base d'un circuit électrique. J'ai découvert qu'en t'initiant virtuellement au surf, je pouvais te faire découvrir les rudiments des circuits électriques. Pas mal, non ?



Un circuit électrique, qu'est-ce que c'est ?

Tout d'abord, lorsque tu veux te payer une descente excitante en surf, tu dois avoir au minimum une piste, un remonte-pente et certains obstacles dans la piste pour rendre ta descente plus électrisante ! Ainsi, tu as un trajet de surf qui te permet de faire autant de descentes que tu le veux. De la même façon, un circuit électrique est un trajet constitué d'au moins un fil conducteur, un générateur (une pile par exemple) et d'éléments qu'on peut y brancher (comme une ampoule). Un circuit est en quelque sorte un snowpark où des électrons libres, les utilisateurs du snowpark, circulent selon des règles bien précises.



Que se passe-t-il dans un circuit électrique?

Le courant électrique du circuit et le débit de surfeurs sur la piste

Par une belle journée de février, pendant que tu te relèves d'une chute au milieu de ta piste préférée, tu observes un phénomène étonnant. Pendant environ cinq secondes, une dizaine de surfeurs passent à côté de toi à toute vitesse. Tu réalises alors que si tu voulais connaître le débit de surfeurs de cette piste, tu n'aurais qu'à compter le nombre de gens qui passent devant toi à chaque seconde. Tu constates alors que si la piste était un fil conducteur et que les surfeurs étaient des électrons libres, tu pourrais refaire la même expérience et calculer le nombre d'électrons qui passent en un point précis du fil à chaque seconde. Le débit d'électrons dans un fil conducteur est ce qu'on appelle courant électrique. L'unité conventionnelle du courant électrique est l'ampère.

Maintenant, tu commences à être capable de mieux te représenter ce que sont un circuit électrique et le courant circulant dans celui-ci. Ta découverte du courant électrique t'amène cependant à te poser d'autres questions. Sur une piste, pourquoi un surfeur avance-t-il sans fournir d'effort ? En se laissant aller, pourrait-il avancer s'il se trouvait sur un parcours parfaitement horizontal ? Dans une piste, comment pourrais-tu savoir si le débit de surfeurs est élevé ou faible ?

La différence de potentiel dans le circuit et la différence de hauteur entre deux points de la piste

Toujours par cette journée ensoleillée de février, tu t'arrêtes au bas de la pente pour te reposer un peu et tu regardes l'allure de deux pistes distinctes. Avec cette vue d'ensemble, tu constates que, bien que les deux pistes se rejoignent en bas de la montagne au même endroit, le départ de la piste de droite est beaucoup plus haut que celui de la piste de gauche.

Selon ton estimation, une vingtaine de mètres de hauteur sépare le départ de chaque piste. Tu te demandes alors si la différence de hauteur entre le point de départ et le point d'arrivée d'une piste aura une influence sur le débit des surfeurs dans cette piste.



Partons de la situation où tu te trouves au sommet d'une montagne, debout sur ta planche et au bout d'une piste de ski parfaitement horizontale. Pourrais-tu te rendre à l'autre bout si tu te laisses aller ? Non et sais-tu pourquoi ? Parce qu'il n'y a pas de différence de hauteur entre le point où tu te trouves et l'autre bout de la piste. Imaginons maintenant que tu es au point le plus élevé d'une piste qui est assez inclinée. En ne fournissant aucun effort, pourrais-tu te rendre à l'autre bout qui se trouve plus bas ? Bien sûr que oui ! Or, tu commences à douter qu'il doit bien y avoir, dans un circuit électrique, une équivalence à la différence de hauteur sur une piste de ski. Tu as parfaitement raison et c'est ce qu'on appelle la différence de potentiel.

La différence de potentiel dans un circuit électrique est ce qui engendre le courant. Par exemple, en laboratoire, si on mesure une différence de potentiel non nulle entre deux points d'un circuit électrique, alors on peut affirmer qu'il y a présence d'un courant électrique dans le circuit. C'est un indice que les électrons se déplacent. Parallèlement, on pourrait affirmer qu'un surfeur qui se trouve sur une piste inclinée sera inévitablement attiré vers le bas de la montagne s'il se trouve au sommet de celle-ci. On appelle habituellement tension électrique, la différence de potentiel dans un circuit électrique. L'unité utilisée pour exprimer la tension électrique est le volt.

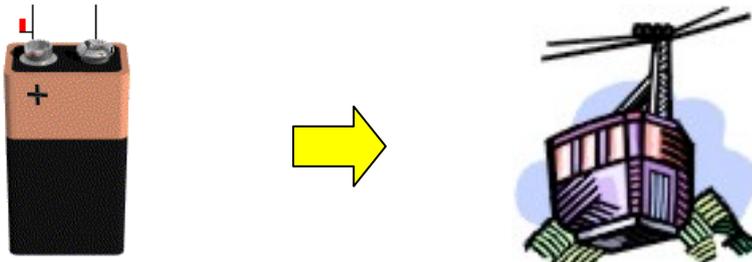
Maintenant, tu connais ce que sont le courant électrique et la tension électrique d'un circuit. Cela dit, serais-tu capable de me dire à quoi sert une pile dans un circuit électrique ?

La pile du circuit électrique et le remonte-pente de la piste

Lorsque tu arrives à la station de ski le matin, quelle est l'action essentielle que tu dois poser pour descendre dans une piste ? Il faut absolument que tu prennes le remonte-pente sans quoi, tu ne pourras jamais t'éclater à dévaler une pente ! Tu me diras que cela est bien évident, car tout le monde sait que pour descendre dans une piste, il faut d'abord monter au sommet de celle-ci. En effet, tu as raison. Le rôle du remonte-pente est de t'amener, sans que tu ne fasses d'effort, dans une situation où il te sera possible de descendre dans une piste. Mais après ta première descente, que dois-tu faire lorsque tu es revenu au point le plus bas de la piste et que tu veux continuer à faire de la planche ? Reprendre le remonte-pente, évidemment !

Dans un circuit électrique, la pile joue le même rôle pour les électrons que le remonte-pente pour toi. Celle-ci amène les électrons dans un état où ils peuvent ensuite engendrer un courant électrique, c'est-à-dire

«dévaler» dans le circuit à cause d'une différence de potentiel. Pour te donner un exemple, une pile de 9 volts signifie que cette pile peut prendre un électron qui a un potentiel de zéro volt et l'amener ensuite dans un état où il aura un potentiel de 9 volts.



Une fois ce potentiel élevé atteint, l'électron peut ensuite «descendre» dans le circuit. Exactement comme toi lorsque, à la hâte, tu quittes le siège du remonte-pente pour aller glisser dans une piste de poudreuse !

Tu ne pensais pas qu'un circuit électrique était aussi simple ? Tant mieux, mais il reste encore d'autres notions. Tu as sûrement remarqué qu'à la station de ski, plusieurs pistes de niveaux différents s'offrent à toi. Pourquoi une piste est-elle plus facile qu'une autre ? Serait-ce à cause du nombre d'obstacles dans cette piste ? Du nombre de bosses ? De l'inclinaison de la piste ?

La résistance dans le circuit et un obstacle dans une piste

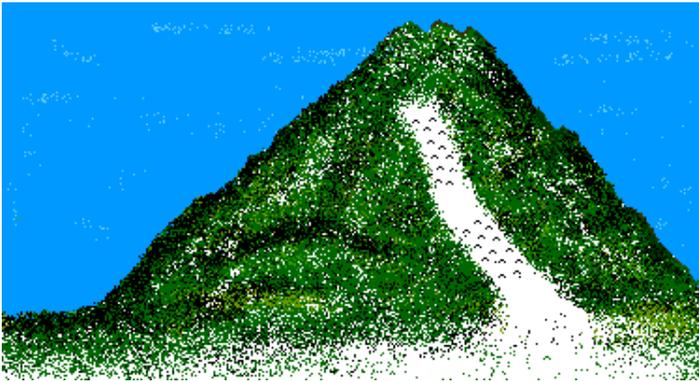
Puisque tes amis et toi aimez beaucoup les sensations fortes, vous décidez de faire une descente dans la piste qui contient le plus de bosses. Or, pendant que tu la dévales en zigzag, tu remarques que tous les surfeurs et skieurs descendent très lentement, tout comme toi d'ailleurs! Une fois en bas, tu comprends la raison pour laquelle les utilisateurs de cette piste ne descendent pas rapidement: il y a trop d'obstacles! En regardant alors l'ensemble des pistes de la montagne, tu constates que le débit de surfeurs le plus faible est dans les pistes présentant le plus de bosses. Autrement dit, moins les obstacles dans la piste sont nombreux, plus le débit des surfeurs est grand. Est-ce que les électrons peuvent aussi être freinés de la sorte dans un circuit électrique ? Mais bien sûr que oui ! Cette opposition à la circulation des électrons dans un circuit s'appelle la résistance électrique.

Comme des surfeurs qui rencontrent une série d'obstacles dans une piste, les électrons sont ralentis lorsqu'ils rencontrent un élément du circuit qui présente une grande résistance à leur déplacement. Une résistance est un exemple d'élément d'un circuit qui offre une résistance électrique. Par convention, l'unité de résistance électrique est l'ohm.

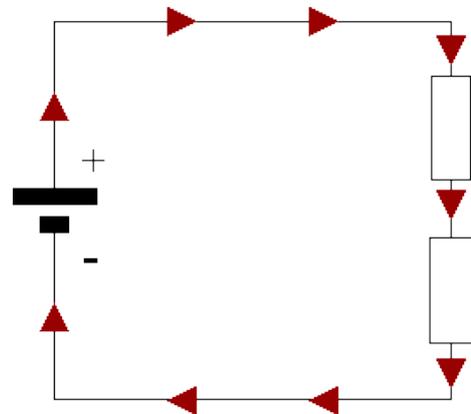
Tu connais maintenant les points fondamentaux d'un circuit. Un circuit simple peut être constitué d'une pile, d'une résistance et de fils qui relient chaque élément les uns aux autres. Une question te vient alors en tête à ce moment-ci: existe-t-il différents types de circuits ?

Un circuit monté en série et une station de ski à piste unique

Imaginons que tu te rendes à une station de ski à piste unique. Les surfeurs comme toi aiment beaucoup cette station, car même si elle n'offre qu'une piste, celle-ci contient beaucoup de bosses! En fait, elle est très amusante, car au tout début de la descente, de nombreuses bosses s'étalent environ sur une soixantaine de mètres. Ensuite, la piste devient très plane sur une distance d'environ 100 mètres. Un peu plus loin, un second amoncellement de neige s'étale sur environ 100 mètres dans la piste. Finalement, le reste de la piste est très plat jusqu'au bas de la montagne. Si tu veux descendre dans cette piste, tu n'as pas le choix de franchir les deux groupes de bosses, peu importe la façon dont tu descendras dans celle-ci.



Si tu es capable de t'imaginer cette situation, tu comprendras alors ce qu'est un circuit électrique monté en série. En effet, un tel circuit fait référence à des éléments branchés les uns à la suite des autres. Les électrons qui circulent dans celui-ci passent obligatoirement par chacune des composantes du circuit. Par exemple, notre station de ski à piste unique contenant deux groupes de bosses serait un circuit dans lequel nous comptons deux résistances différentes reliées par un fil. Les électrons qui partent de la pile doivent absolument passer par chaque résistance avant de revenir à la pile. Pas mal, hein ! Je suis certain que tu dois maintenant te demander s'il existe un type de circuit dans lequel les électrons ont le choix de passer par plusieurs chemins. D'après toi ?



Un circuit monté en parallèle et une station de ski à deux pistes adjacentes

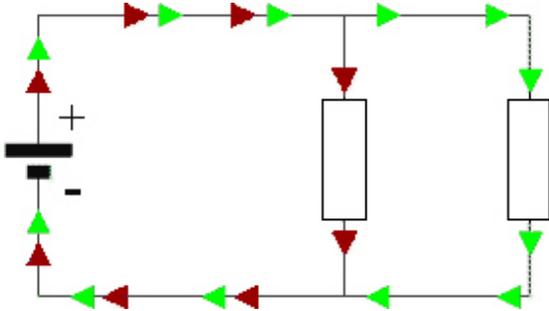
Supposons que tu as trouvé une station de ski où une piste se dédouble en un endroit pour former deux pistes parallèles. Un peu avant le bas de la pente, avant la fin de celle-ci, les deux pistes se rejoignent pour ne former à nouveau qu'une seule piste. Tu vois ? D'en bas, avant de prendre le remonte-pente, tu regardes le comportement des surfeurs pour observer le débit de ceux-ci dans chaque branche de la double piste. À ton grand étonnement, tu constates que dans la branche de gauche, le débit des surfeurs est très lent alors que dans celle de droite, il est beaucoup plus élevé. Aussi, à l'embranchement, tu remarques que le débit des surfeurs redevient le même qu'en haut de la piste, avant que celle-ci ne se sépare en deux ! Pour comprendre ce qui se passe et en avoir le cœur net, tu décides alors de prendre le remonte-pente et de faire chacun des trajets, un après l'autre.



Une fois les deux trajets parcourus, tu comprends la raison de la différence des débits de chaque branche de la piste. Celle de gauche est remplie de bosses et de trous qui ralentissent les skieurs et les surfeurs. Pour ce qui est de la branche de droite, elle ne contient presque pas d'obstacles et les surfeurs s'en donnent à cœur joie dans la vitesse ! Finalement, tu as bel et bien constaté que le débit des surfeurs, lorsque les deux

parties parallèles de la piste se rejoignent, est le même qu'au sommet de la piste. En effet, tous les surfeurs finissent bien par descendre et doivent absolument passer par là!

Si on transpose maintenant ce type de piste aux circuits électriques, on dit alors qu'on a un circuit monté en parallèle. Par exemple, un tel circuit est constitué d'au minimum une pile reliée à deux résistances qui eux, sont branchés en parallèle. Un électron qui quitte la pile avec un certain potentiel a le choix de passer par l'une ou l'autre des résistances.



Le débit des électrons dans la branche du circuit où la résistance est la plus élevée sera le plus faible. Les électrons avancent moins vite si la résistance est plus grande, ça a plein de gros bon sens! C'est exactement comme les surfeurs qui diminuent de vitesse dans la branche aux nombreuses bosses, contrairement à ceux de l'autre branche qui sont peu ralentis, car les obstacles sont moins nombreux. Voilà donc le comportement des électrons dans un circuit monté en parallèle.

En terminant

Maintenant que tu as lu ce texte, tu peux probablement mieux comprendre les notions reliées aux circuits électriques comme le courant, la tension et la résistance. Aussi, tu connais le comportement des électrons dans les circuits montés en parallèle et en série. Il ne te reste donc plus qu'à aller au laboratoire et faire des expériences dans le but de vérifier ta compréhension des circuits électriques. Autrement, tu peux toujours chausser tes bottes et ta planche et vivre sur une piste de ski l'expérience d'un électron dans un circuit électrique!



Autres modèles :

Tirés des questionnaires remplis par mes élèves, voici encore quelques modèles utilisés dans nos classes (donc acquis auprès de collègues durant leur parcours scolaire).

Modèle « rivière » :

La différence de hauteur entre l'amont et l'aval représente la tension, le débit de la rivière le courant et un rétrécissement de la rivière (ou un barrage) une résistance. On peut noter qu'entre l'amont et l'aval d'un rétrécissement apparaît une différence de hauteur d'eau (de tension).

Modèle de « la foule »:

Une foule passe par un rétrécissement (une porte) plus la porte (résistance) est large, plus le débit de personnes (courant) est important.

Modèle « Atmosphérique »

L'eau tombe en pluie sur le haut d'une montagne (potentiel élevé), un lac est retenu par un barrage, l'eau s'écoule dans un tuyau jusqu'à la station de turbinage (potentiel bas) la turbine limite le débit d'eau, elle s'écoule dans un lac, s'évapore (alimentation) et tombe à nouveau en pluie.

Critique des analogies :

De la description du modèle, chacun des points suivant seront examinés.

- 1) Le conducteur est rempli de particules qui se déplacent.
- 2) Le circuit est fermé sur lui-même.
- 3) Le courant correspond à la circulation des particules.
- 4) La valeur du courant est proportionnelle au débit de particules.
- 5) Un générateur maintient cette circulation.
- 6) Le générateur a un pôle + et un pôle –.
- 7) La force électromotrice du générateur est sa capacité à mettre les particules en mouvement.
- 8) La résistance représente la capacité de freiner le passage du courant.
- 9) Les particules remplissent le conducteur, sont en nombre constant et sont incompressibles.
- 10) La résistance équivalente à deux résistances en série égale la somme des ces résistances.
- 11) La résistance équivalente à deux résistances en parallèle égale à $R1 \cdot R2 / (R1 + R2)$
- 12) L'intensité du courant est proportionnelle à la force électromotrice et inversement proportionnelle à la résistance totale du circuit.

	Pompe et réservoir	Chaîne de vélo	Hydraulique simple	Transport de charbon	Hydraulique partiel	Train	Chaîne humaine	Ronde	Surfeur	Rivière	Foule	Réservoir tuyau	Atmosphérique
1	✓		✓		✓		✓	✓	✓			✓	
2	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓			✓
3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓
5	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓				✓
6	✓	✓	✓				✓						
7	✓	✓	✓			✓			✓	✓		✓	✓
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓
9			✓		✓		✓					✓	
10													
11													
12									✓				

Aucune des analogies présentées ici ne remplit totalement les critères du modèle de base pourtant limité au courant continu et aux circuits résistifs. Il convient donc d'en élaborer un meilleur qui permette de remplir toutes les cases et plus si entente.

Modèle hydraulique :

Le modèle à créer est un modèle qui reprenne toutes les qualités des modèles ci-dessus en ajoutant quelques perfectionnements pour remplir les derniers points du tableau d'évaluation et, pourquoi pas, repousser un peu plus loin encore les limites de son champ d'application.

Le modèle retenu est évidemment un modèle hydraulique. Les raisons sont tirées de l'histoire des sciences, qui ont dès le départ utilisé cette analogie mécanique pour comprendre les phénomènes électriques. Nous avons d'ailleurs gardé dans le langage des traces de cette épopée de la physique (bouteille de Leyde 1746). Ainsi le « courant » électrique « circule » et tous nos élèves connaissent la « prise de courant » au début de leurs études.

C'est donc « aller avec pour aller contre » en utilisant les représentations existantes dans la culture commune que nous allons parvenir à orienter les représentations partielles, non abouties vers des représentations de la physique.

Parmi tous les modèles évoqués plus haut, plusieurs sont issus du modèle hydraulique. Auquel de multiples vertus sont reconnues mais auquel on connaît quelques défauts.

Reproches faits à ce modèle:

On trouve dans la littérature des objections faites à l'analogie hydraulique, notamment dans (Caillot 1993 p.42), voici une liste de ces objections relevées dans ces ouvrages.

La question de l'âge, déjà évoqué plus haut, n'est plus si aigu dans mon cas que dans la plupart des cas d'étude basés sur des classes du primaire ou du secondaire car nos étudiants sont des gens plus âgés (16-20), intéressés par la technique, et donc généralement plus avancés dans le domaine. De plus, nos élèves ont des cours qui traitent des lois de base de l'hydraulique mais sans, par contre, toucher le domaine hydrodynamique.

Pour les modèles « ouverts » (atmosphérique, réservoir, rivière) on peut opposer le fait que l'on ne raisonne pas ici en fonction d'un tout (système), donc que les perturbations de l'aval n'ont pas d'effet en amont.

La question de savoir ce qu'il arrive lorsque l'on ouvre le circuit est également un problème reconnu. Un circuit d'eau que l'on ouvre aura tendance à se vider de son contenu, alors que cela n'arrive pas en électricité.

Une autre critique est basée sur la méconnaissance des élèves du milieu analogue. Les élèves seraient mis devant un problème supplémentaire consistant à déterminer le comportement du circuit hydraulique et ajoutant de cette manière des difficultés plus qu'il n'en élimine. On trouve dans la même optique le fait que l'on prend le risque de détourner l'attention des élèves de l'objet d'étude initial vers un autre dont la compréhension n'est pas le but de la leçon.

Une question intéressante est la question des défauts d'isomorphisme entre l'analogie et la réalité qui vont demander un tri serré des relations valides et des autres et éventuellement provoquer le rejet pur et simple de cet outil par les élèves qui renonceront à faire l'effort de modifier leur modèle interne aussitôt qu'ils auront découvert une limite à la validité du modèle et ne vont faire aucun effort pour une analogie « qui ne marche même pas » .

Résumé des objections:

S'il reste un doute quant aux compétences de mes élèves dans le domaine hydrodynamique cependant je n'en ferai pas un obstacle majeur car comme Brna / Duncan 1996 (chap. « How Can Analogies be Used to Learn »), je pense que les connaissances dans le domaine analogique peuvent progresser parallèlement au domaine empirique, nourrir et se nourrir de celui-ci.

Le modèle que je propose va devoir palier aux objections de la page précédente afin d'en faire un instrument fiable, (circuit fermé, rien ne coule lors de l'ouverture du circuit) correspondant trait pour trait à son champ empirique et permettant une exploration aussi étendue que possible du domaine de connaissance, maximisant ainsi le rendement de l'effort de compréhension pour le domaine analogue et limitant au minimum les objections que pourraient faire les élèves quant à la validité du modèle pour ainsi ne pas donner de prise aux vellétés de rejet de celui-ci en faveur de leur modèle antérieur.

Suivant les préceptes énoncés plus haut, si l'étendue d'utilisation d'un modèle définit sa qualité, alors je vais tenter de proposer un modèle de haute qualité.

Réalisation :

Le modèle peut se concrétiser sous plusieurs formes, en dessin, images, images animées, film ou réalisé concrètement avec des objets « en chair et en os ».

C'est cette dernière solution qui a été retenue du fait que son utilisation gagne en efficacité sur plusieurs plans :

- Niveau d'abstraction le plus bas possible classé « 0 » sur l'échelle d'iconicité de A. Moles « Théorie informationnelle des schémas » trouvé dans (Astolfi, Darot, Ginsburger-Vogel, Toussaint 1997 p. 422). La représentation des objets est toujours moins directe que de voir les objets eux-mêmes.
- Modifications par les élèves : Un modèle se doit d'être interactif pour que les élèves puissent tester différentes options et confronter leurs conceptions avec le modèle.
- Manipulation possible : Avoir quelque chose entre les mains est primordial pour ceux qui privilégient le canal sensoriel kinesthésique.
- Effet de surprise : On retient toujours mieux ce qui sort de l'ordinaire, à savoir, des objets issus de la mécanique qui, pour des électriciens, ont toujours quelque chose d'intrigant.

Le Modèle

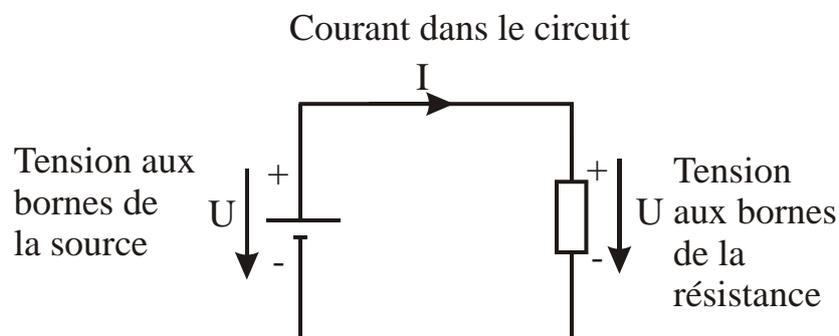
Je vais, dans les pages qui suivent, détailler les constituants du modèle hydraulique que j'ai construit et faire le parallèle physique entre les deux domaines de manière systématique.

Rappel des relations de base de l'analogie hydraulique-électrique :

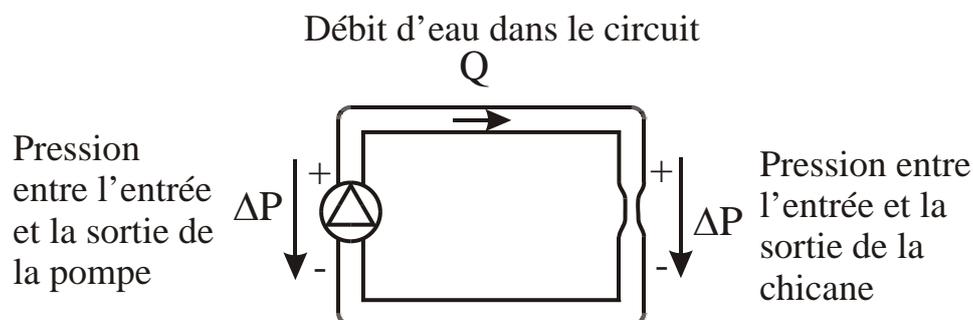
Champ empirique :			Champ théorique :		
Grandeur	Symbole	Unité	Grandeur	Symbole	Unité
Tension	U	Volt [V]	Pression	P	Pascal [Pa] ou [bar]
Courant	I	Ampère [A]	Débit	Q	[m ³ /s] ou [l/min]
Résistance	R	Ohm [Ω]	Coeff. de résistance	ζ	[s ² ·N/(m·kg)]

Une question subsiste quant à ce coefficient de résistance ζ (dzeta) qui n'est pas à proprement parler l'équivalent de la résistance R mais qui entre tout de même dans le calcul de celle-ci.

Circuit électrique :



Circuit hydraulique :



Résistance :

Je vous propose donc de faire un détour par la physique des écoulements :

Les gens qui n'aiment pas la physique peuvent profiter de s'instruire ou ... tourner la page.

La résistance d'un tuyau hydraulique est liée aux dimensions de l'écoulement, à la vitesse, à la viscosité du fluide, à la rugosité du matériau, etc. toutes ces grandeurs sont fixes pour une résistance placée dans un circuit hydraulique (sauf la vitesse) et la relation entre la vitesse de l'écoulement (débit) et la perte de charge en découlant (pression) est la suivante :

$$\Delta P = \rho \cdot \zeta \cdot l/d \cdot v^2/2$$

ρ : masse volumique du liquide [kg/m^3]

ζ : coefficient de résistance [$\text{s}^2 \cdot \text{N}/(\text{m} \cdot \text{kg})$]

l : longueur du tuyau [m]

d : diamètre intérieur du tuyau [m]

v : vitesse du fluide [m/s]

pour connaître le coefficient de résistance ζ , il faut déterminer si l'écoulement est turbulent ou laminaire, ceci se fait en calculant le nombre de Reynolds de l'écoulement :

Pour un tuyau cylindrique :

$$Re = v \cdot d \cdot \rho / \eta \quad \eta : \text{viscosité dynamique du fluide [Pa} \cdot \text{s]}$$

On remarque que dans notre cas que le débit mesuré est de 3 l/min au maximum soit $5 \cdot 10^{-5} [\text{m}^3/\text{s}]$

La résistance hydraulique utilisée pour un premier test était un galet de 8 mm d'épaisseur percé d'un trou de 1 mm \varnothing en son centre.

La viscosité dynamique de l'eau à 20°C est d'environ $10^{-3} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$.

La vitesse de l'écoulement est de 63.6 [m/s]

Ceci nous donne un nombre de Reynolds de 63600 largement supérieur à 2320 limite de l'écoulement laminaire. Nous avons donc affaire à un écoulement turbulent et il faut remédier à cela en modifiant la géométrie de la résistance.

Le choix d'une configuration comportant un écoulement laminaire est motivé par le fait qu'un écoulement laminaire conduit à un rapport constant entre ΔP (chute de pression) et Q (débit) pour que le comportement soit identique entre résistance électrique et hydraulique.

Les écoulements turbulents n'ont pas cette caractéristique et il faut alors aller chercher une valeur de ζ dépendante du débit et d'autres conditions d'écoulement dans un abaque.

Une solution à ce problème est de fractionner le débit en multipliant le nombre de trous de diamètre inférieur.

La difficulté est de trouver un nombre de trous suffisant (fractionner le débit) de diamètre assez gros pour être usinable et qui constitue toujours une résistance hydraulique de valeur correcte.

Après plusieurs essais, une des possibilités est de créer une résistance qui fait 10 cm de long (fractionnée en une dizaine de parties donc en plus modulable) et percée de 80 trous de 0.4 mm de diamètre. Donc $Re = 1990$ pour 3 l/min et $\Delta P = 1$ bar.

Ceci nous conduit pour un écoulement laminaire au calcul de ζ selon la formule $\zeta = 64/Re$

$$\text{Soit pour } \Delta P : \Delta P = \frac{\rho \cdot l \cdot v^2}{2 \cdot d} \cdot \frac{64 \cdot \eta}{v \cdot d \cdot \rho} = 32 \cdot \eta \cdot v \cdot l / d^2 \quad [\text{Pa}]$$

Cette relation est cette fois conforme à la relation en électricité car elle pose qu'une constante ($32 \cdot \eta \cdot l/d^2$) lie la vitesse d'écoulement (proportionnelle au débit) à la perte de charge dans cette résistance, c'est une relation linéaire équivalente à la résistance électrique.

Comme la vitesse est la division du débit par la surface totale de passage du fluide :

$$v = Q \cdot 4 / (\pi \cdot d^2 \cdot n)$$

On peut écrire la résistance comme étant $\Delta P/Q$:

$$\Delta P/Q = \frac{128 \cdot \eta \cdot l}{\pi \cdot d^4 \cdot n}$$

n : nombre de trous

d : diamètre d'un des trous [m]

ΔP : pression [Pa]

Q : [m³/s]

l : longueur de la résistance en [m]

η : viscosité dynamique du fluide [Pa · s] (0.001 pour l'eau à 20 °C)

Pour mes résistances, une valeur intéressante utilisable dans les expériences est la perte de charge (ΔP en bar) pour un débit (Q en l/min). On peut également utiliser les unités de la mécanique [mm].

Ces valeurs sont pour mon cas :

$$R_{\text{hyd}} = \Delta P/Q = \frac{128 \cdot \eta \cdot l}{\pi \cdot d^4 \cdot n \cdot 6}$$

n : nombre de trous

d : diamètre d'un des trous [mm]

ΔP : pression [bar]

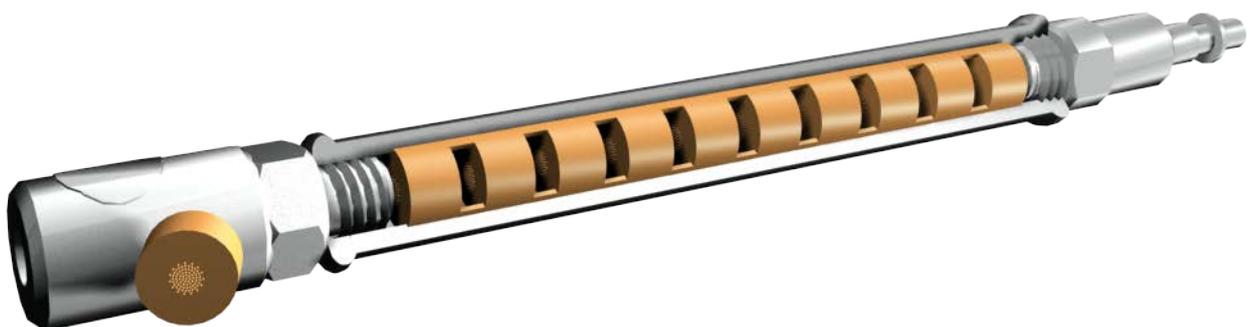
Q : [l/min]

l : longueur de la résistance en [mm]

η : viscosité dynamique du fluide [Pa · s] (0.001 pour l'eau à 20 °C)

Les valeurs pour une résistance constituée (comme représenté ci-dessous) de 80 trous de 0.4 mm de diamètre et de 10 cm de longueur cumulée abouti à une valeur calculée de :

$$R_{\text{hyd}} = 0.33 \text{ bar} / (\text{l/min}) \text{ ou, en unité SI : } 1.98 \cdot 10^9 \text{ Pa} / (\text{m}^3/\text{s}) \text{ mais encore } 1.98 \cdot 10^9 \text{ kg} / (\text{s} \cdot \text{m}^4)$$



Relations tirées de Gieck formulaire technique 9^{ème} édition 1990

Comme indiqué plus haut, les deux résistances sont matérialisées sous la forme de deux raccords entre lesquels est monté un manchon qui abrite un disque percé d'un trou de 1 et 1.5 mm de diamètre pour l'une ou l'autre des résistances.



Cette version n'est pas linéaire mais suffisamment pour mes démonstrations, utilisée dans l'attente de la fabrication éventuelle d'une meilleure version.

Résistance à sable :

Une remarque a été faite par un lecteur pour modifier cette résistance en une résistance à sable dont la granulométrie pourrait être l'image de la résistivité.

On peut alors comparer une résistance de faible valeur à un filtre à gros galets et une grande résistance à un filtre constitué de sable très fin.

La section de passage va modifier cette résistance, une plus grande surface d'un filtre déterminé permettant le passage de plus d'eau pour une même différence de pression.

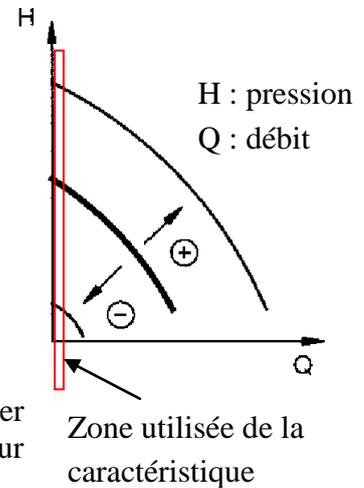
Ce n'est pas une mauvaise idée, quid par contre de la maîtrise du paramètre d'écoulement laminaire/turbulent pour une réalisation pratique ? Des tests seront à faire.

Source :

La source de pression (tension) est constituée d'une pompe centrifuge qui peut fournir un débit de 2.5 m^3 à l'heure soit 41.5 l/min pour une pression de 1.86 bar (19m)

Cette pompe peut très bien débiter le débit nominal, mais aussi aucun débit sans que cela ne pose problème. Elle se comporte donc bien comme une source de pression et non comme une source de courant (à débit constant). Nous l'utiliserons dans une très petite zone de sa caractéristique (vers $1\text{-}3 \text{ l/min}$) pour éviter que n'apparaisse la diminution de pression due au parcours de la caractéristique de la pompe (résistance interne de la source peu visible).

Cette pompe est munie d'un variateur de vitesse qui permet de diminuer ou augmenter la pression fournie au moyen d'un potentiomètre. (+/- sur le graphique)



Conducteurs :

Les tuyaux sont standard, supportent plus de 10 bar de pression, diamètre intérieur 13mm



J'ai cherché des tuyaux de couleur correspondante aux couleurs de fil des circuits électrique, on câble souvent les alimentations en rouge et les masses en bleu. Malheureusement, je n'ai pas trouvé de tube de couleur adéquate correspondant aux contraintes mécaniques de mon application.

Connexions :

Les raccords sont de type « double obturation » pour permettre de débrancher le circuit tout en gardant l'eau à l'intérieur. Je veux dire par là que si l'on ouvre n'importe lequel des points de connexion, chacune des parties male et femelle est bouchée de sorte que pas une goutte d'eau ne coule quand bien même la pompe tournerait à plein régime.



La limite de débit pour l'utilisation de ces raccords sans trop de perte de charge est aux environs de 3 l/min, ceci correspond selon les caractéristiques à une perte de 0.1 bar, tolérable au vu des 2 bar fournis par ma source.

Débitmètre (ampèremètre) :

Les ampèremètres sont constitués de la même manière que les inductances, au détail près que les inductances sont munies d'un disque d'inertie alors que les ampèremètres ne font tourner qu'un disque mettant en évidence la rotation. La version représentée ici est un débitmètre qui a la fâcheuse tendance à ne pas s'arrêter immédiatement alors que le courant, lui s'est arrêté net (interrupteur ouvert). Cette version est également utilisée faute de mieux



Différence de pression (voltmètre) :

La difficulté est ici de trouver des manomètres différentiels à un prix abordable. Ceux que j'ai trouvés sur le marché m'ont été proposés à 1000.- pièce, ce qui multiplié par trois, représente une coquette somme. Les autres solutions étudiées ne permettaient par une utilisation satisfaisante pédagogiquement parlant. Heureusement, j'ai pu bénéficier des appuis de mon école pour cet achat dispendieux.

Les manomètres que je vais utiliser en attendant les manomètres différentiels sont de petits appareils bon marché (20 Frs) qui n'ont qu'une connexion mais qui peuvent mettre en évidence les potentiels en divers points du circuit.



Vanne (Interrupteur) :

J'ai utilisé ici une vanne à bille « quart de tour » comme équivalent à l'interrupteur électrique.



Diode :

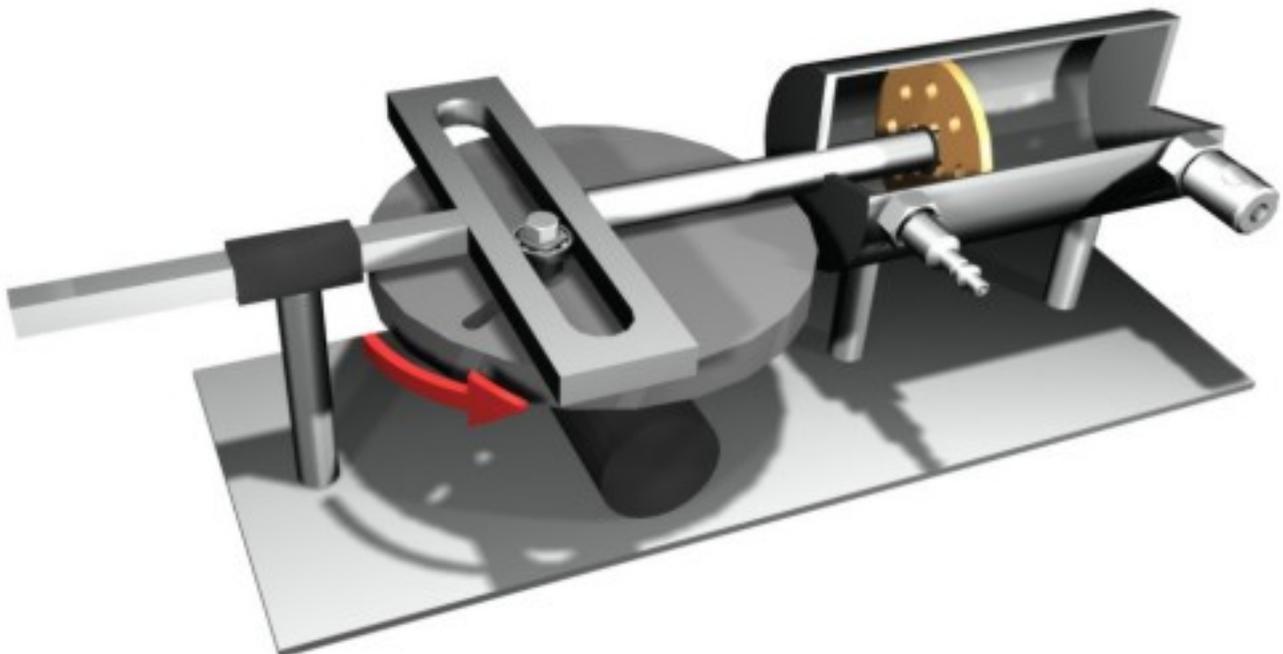
La diode est constituée d'un « clapet » anti-retour, une bille pressée par un ressort qui, par son appui, produira les 0.7 bar de chute de pression dans le sens passant.



Source alternative :

Cette source doit être une source de tension (et pas de courant) et générer une forme de tension sinusoïdale.

Le dessin proposé n'est pas prévu pour la réalisation dans un avenir immédiat, mais pourrait être une extension intéressante pour la maquette actuelle.



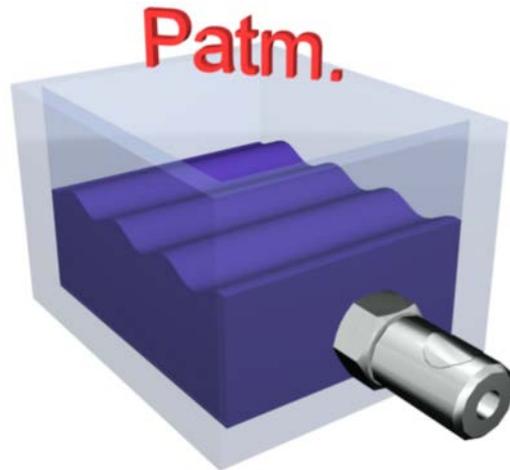
L'amplitude de la variation de pression est réglable en changeant la position du galet de roulement dans la fente du disque de rotation. La fréquence est réglable en variant la vitesse de rotation du moteur d'entraînement que l'on distingue en noir au-dessous du disque.

Point de masse :

Un élément que l'on peut modéliser aisément est le point de potentiel neutre ou, point de masse. Ce composant peut être constitué d'un réservoir d'une contenance de 0.5 à 1 litre

Cette contenance n'est pas critique mais elle doit être suffisante pour compenser la variation de volume interne du circuit induite par la dilatation des tuyaux sous la pression de fonctionnement (quelques centilitres).

On va par l'intermédiaire de celui-ci fixer la pression absolue dans le circuit. La valeur que nous aurons par défaut est la pression atmosphérique mais on pourrait imaginer brancher ce point sur le réseau d'eau potable et le monter au potentiel de celui-ci (3-7 bars).



Condensateur :

Le condensateur est fabriqué maison avec un piston étanche de part et d'autre duquel sont appuyés deux ressorts le tout couissant dans un tube transparent.

La caractéristique des ressorts et du cylindre (constante A^2/k) correspond à la constante (C) du condensateur comme nous le démontre les relations suivantes. J'ai utilisé la charge du condensateur à courant constant comme support de la démonstration, mais les relations restent valables pour d'autres utilisations du condensateur.

Condensateur électrique :

$$U = I \cdot t / C$$

C : capacité en [F]

U : tension entre les bornes en [V]

I : courant en [A]

t : temps en [s]

Condensateur hydraulique :

$$\Delta P = Q \cdot t \cdot k / A^2$$

k : constante du ressort en [N/m]

P : pression entre les bornes en $[N/m^2] = [Pa]$

Q : débit en $[m^3/s]$

t : temps en [s]

A : aire du piston en $[m^2]$

Calcul de la capacité de ce condensateur :

Dans la formule, C correspond à $C_{hyd} = A^2/k$

$$C_{hyd} = \frac{\pi^2 \cdot d^4}{16 \cdot k}$$

d : diamètre intérieur du tube [m]

k : constante du ressort en [N/m]

Si l'on place les caractéristiques de notre condensateur dans la formule, nous avons : $d = 0.05 \text{ m}$

$$k = 2800 \text{ N/m}$$

La capacité vaut $1.37 \cdot 10^{-9} \text{ m}^5/\text{N}$

Charge à tension constante :

Si l'on crée un circuit qui comprend la résistance calculée plus haut et le condensateur ci-devant, on obtient, comme en électricité, une constante de temps

$$\tau = R \cdot C \quad \text{Unités : } [Pa / (m^3/s)] \cdot [m^5 / N] = [s]$$

$$R_{hyd} \cdot C_{hyd} = 1.28 \cdot 10^9 \cdot 1.37 \cdot 10^{-9} = 1.74 \text{ [s]}$$

Cette valeur d'environ 2 secondes est tout à fait acceptable pour une démonstration en classe. On compte qu'il faut 5 fois ce temps pour la charge complète du condensateur, ce qui nous donne environ 10 s pour le déroulement de la démonstration de charge.



Inductance :

L'inductance est constituée d'une turbine volumétrique de fabrication maison sur laquelle on peut monter différentes tailles de disques d'inertie pour varier la capacité de stockage d'énergie cinétique de la self et donc la valeur de L.

Les calculs détaillés qui conduisent au dimensionnement de cette turbine se trouvent en annexe.

Je ne mentionnerai ici que les relations qui concernent l'analogie.

Self électrique

$$U = L \cdot \Delta I / \Delta t$$

U : tension en [V]

L : inductance en [H]

ΔI : courant [A]

Δt : temps [s]

Self hydraulique

$$P = L_{hyd} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{J}{2 \cdot \pi \cdot A \cdot r \cdot V} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

J : moment d'inertie [kg · m²]

ΔQ : débit [m³/s]

Δt : temps [s]

A : surface moyenne (moyenne des carrés) d'une palette [m²]

r : rayon moyen (moyenne des carrés) du centre de poussée de la palette [m]

V : Volume turbiné par radian [m³ / rad]

P : Pression entre les bornes de la turbine [Pa]

Les grandeurs autres que Q et t sont des constantes liées à la configuration de la turbine ~ L_{hyd}

Justification :

Couple d'accélération: Ma = J · a

avec a : accélération angulaire en [rad/s²] qui est liée à la variation (accélération) du débit par une constante :

Le volume turbiné par radian V [m³/rad] ou

2π · V en [m³ / tour]

$\Delta Q / \Delta t = a \cdot V$ [m³/s²] donc

$$Ma = \frac{J \cdot \Delta Q}{2 \cdot \pi \cdot V \cdot \Delta t} \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

Ce couple est équilibré par le couple d'entraînement de la turbine :

$$Mm = F \cdot r = P \cdot A \cdot r$$

Donc si Ma = Mm :

$$\frac{J \cdot \Delta Q}{2 \cdot \pi \cdot \Delta t \cdot V} = P \cdot A \cdot r$$

On sort en définitive :

$$P = \frac{J}{2 \cdot \pi \cdot A \cdot r \cdot V} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

L_{hyd} en [kg / m⁴]



Constante de temps

On peut constater dans les formules de la page précédente que L (inductance) du circuit électrique correspond à $J / (2\pi \cdot V \cdot A \cdot r)$ du circuit hydraulique.

Si l'on considère la valeur de M_m obtenue dans le calcul du couple moyen (voir annexe II), on peut alors calculer la valeur de $A \cdot r = M_m / \Delta P$ dont j'ai besoin dans mon calcul de L soit :

$$A \cdot r = 0.474 / 200000 = 2.37 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Pour un disque de fonte de 260 mm de diamètre, d'une épaisseur de 30 mm, et d'une masse de 11.5 Kg, nous avons une valeur de J de $0.098 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$

Le volume turbiné par tour ($2\pi \cdot V$) est dans mon cas de $1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$

La valeur de L_{hyd} est donc de : $4.135 \cdot 10^9 \text{ kg} \cdot \text{rad} / \text{m}^4$

La constante de temps du circuit RL que nous pourrions créer grâce à cette inductance et la résistance décrite plus haut est de :

$$\tau = L / R$$

$$\text{Soit : } 4.135 \cdot 10^9 / (1.98 \cdot 10^9) = 2.1 \text{ s}$$

Cette valeur de 2 s paraît bonne pour une utilisation en classe sachant que le phénomène de « résistance » à la croissance du débit complet prend environ 5 fois ce temps.

Résonance

Pour une démonstration en alternatif qui comprendrait un générateur alternatif (encore en projet), un condensateur et une self, la fréquence de résonance est calculée selon la formule :

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}}$$

qui dans le cas présent avec une self $L_{\text{hyd}} = 4.135 \cdot 10^9 \text{ kg} \cdot \text{rad} / \text{m}^4$ et $C_{\text{hyd}} = 1.37 \cdot 10^{-9} \text{ m}^5 / \text{N}$ conduit à une fréquence de 1/16 Hz. Cette valeur est un peu trop faible et il me semble utile de diminuer la masse d'inertie pour avoir une valeur plus raisonnable aux alentours de 1 Hz.

On y parvient grâce au remplacement de notre disque de 26 cm de diamètre et 30 mm d'épaisseur par un disque de 15 cm de diamètre et 20 mm d'épaisseur.

Dans ce cas :

$$L_{\text{hyd}} = J / (2 \cdot \pi \cdot V \cdot A \cdot r) = 0.0072 / (10^{-5} \cdot 2.37 \cdot 10^{-6}) = 0.304 \cdot 10^9 \text{ kg} \cdot \text{rad} / \text{m}^4$$

Et cette fois le calcul de f donne 0.986 Hz soit environ 1 Hz

Tableau récapitulatif :

Champ empirique :			Champ théorique :		
Grandeur	Symbole	Unité	Grandeur	Symbole	Unité
Tension	U	Volt [V]	Pression	P	Pascal [Pa] ou [bar]
Courant	I	Ampère [A]	Débit	Q	[m ³ /s] ou [l/min]
Résistance	R	Ohm [Ω]	Résistance hydraulique	$R_{\text{hyd}} = \frac{128 \cdot \eta \cdot l}{\pi \cdot d^4 \cdot n}$	[Pa / (m ³ /s)]
Capacité	C	Farad [F]	Capacité hydraulique	$C_{\text{hyd}} = \frac{\pi^2 \cdot d^4}{16 \cdot k}$	[m ⁵ / N]
Inductance	L	Henri [H]	Inductance hydraulique	$L_{\text{hyd}} = \frac{J}{2 \cdot \pi \cdot A \cdot r \cdot V}$	[kg / m ⁴]

Résistance :

n : nombre de trous

d : diamètre d'un des trous [mm]

P : pression entre l'entrée et la sortie de la résistance [bar]

Q : [l/min]

l : longueur de la résistance en [mm]

η : viscosité dynamique du fluide [Pa · s] (0.001 pour l'eau à 20 °C)

Condensateur :

k : constante du ressort en [N/m]

P : pression entre l'entrée et la sortie en [N/m²] = [Pa]

Q : débit en [m³/s]

t : temps en [s]

A : aire du piston en [m²]

Self :

J : moment d'inertie [kg · m²]

ΔQ : débit [m³/s]

Δt : temps [s]

A : surface moyenne (moyenne des carrés) d'une palette [m²]

r : rayon moyen (moyenne des carrés) du centre de poussée de la palette [m]

V : Volume turbiné par radian [m³ / rad]

P : Pression entre l'entrée et la sortie de la turbine [Pa]

Commentaire sur la récapitulation :

Cette comparaison est là pour illustrer le fait que sous les affirmations de la similitude des deux domaines se cache une réelle identité physique de comportement, dans les conditions de réalisation des objets cités plus haut.

Les limites sont pour la résistance le fait d'obtenir un flux laminaire, après quoi elle réagit à l'identique de son équivalent électrique dans la pratique, les résistances telles que définies initialement (un seul trou, flux turbulent) sont suffisamment linéaires pour mettre en évidence le comportement du diviseur de tension (deux résistances série) sans que l'on distingue de non-linéarité.

Pour le condensateur, on pourrait voir des frottements entre le piston et la paroi comme défaut vis-à-vis de son homonyme électrique. Ces frottements peuvent être limités par un choix judicieux des joints (joints à lèvres) et un réglage fin de leur appui sur la paroi. A part cela, pas de différence.

L'inductance est également très proche de la version électrique si l'on fait l'approximation du lissage des variations de couple durant la rotation de la turbine (cf annexe 1). Cette self subira une accélération légèrement pulsée alors que la self électrique ne subit pas ce phénomène. Ce comportement ne devrait pas être visible durant la démonstration et doit selon moi être noyé dans la catégorie « bien sûr, c'est de la mécanique il y a un peu de frottement » (à vérifier).

Ces considérations mécaniques de détail ne doivent pas masquer l'isomorphisme de fond que l'on peut observer dans cet appareillage, et les démonstrations qualitatives qui s'attachent à favoriser la compréhension des relations entre les grandeurs, et à développer les modèles internes des élèves, ne seront nullement affectées par ces défauts.

Champ d'application :

La définition du champ d'application est la suivante :

Cette analogie **peut être utilisée** dans les problèmes d'électrocinétique, pour mettre en évidence les phénomènes suivants :

- Parcours des électrons dans un circuit fermé.
- Circuit pris comme un système (modification en tout point influence l'entier du circuit).
- Courant.
- Notion de potentiel et de masse.
- Lois de Kirchoff (loi des mailles et des nœuds).
- Loi d'Ohm.
- Charge et décharge de condensateur à tension constante.
- Fermeture et ouverture d'un circuit inductif.
- Circuit RC, RL et RLC en alternatif, résonance.
- Redressement et lissage de l'alternatif.
- Fonctionnement d'alimentations à découpage.

Cette analogie montre en revanche ses limites et **ne peut pas être utilisée** dans l'illustration des phénomènes suivants :

- Electrostatique, Electromagnétisme.
- Electronique autre que diode (transistor bipolaire, Jfet, Eléments à 4 couches, etc.)

Présentation de la maquette

Les tuyaux et leurs propriétés :

- Les tuyaux sont pleins d'eau
- L'eau est incompressible

- Débrancher un tuyau ne permet pas à l'eau de couler.
- Lorsque l'eau coule, on parle de débit, nombre de « gouttes » qui passe par seconde

La pompe :

- Une pompe centrifuge « pousse » l'eau vers le tuyau de sortie et « aspire » l'eau du tuyau d'entrée.
- Une pompe crée ainsi une différence de pression qui reste stable quel que soit le débit qui en sort.

Une résistance hydraulique :

- Une résistance est une chicane, elle gêne le passage de l'eau, plus la gêne est importante, moins l'eau peut passer facilement.
- Le fait de gêner le passage du débit crée une différence de pression entre l'amont et l'aval de la résistance.

Un circuit d'eau :

- Si l'on branche le tuyau « de sortie » de la pompe sur le tuyau « d'entrée », on crée un circuit d'eau. On peut mettre un débitmètre pour observer l'eau qui passe.

Parallèle avec un câble :

- Un câble est plein d'électrons
- On ne peut « stocker » des électrons dans un câble.
- Débrancher un fil ne le vide pas de ses électrons.
- Lorsque les électrons circulent, on parle de courant, proportionnel au nombre d'électrons qui passe par seconde.

Parallèle avec la source de tension.

- Une source de tension crée un excès d'électrons sur une des bornes et un manque sur l'autre
- Une source de tension crée une différence de tension stable, quel que soit le courant de sortie

Parallèle avec la résistance électrique :

- Une résistance électrique est constituée d'un matériau qui possède peu d'électrons libres « à échanger » pour permettre la circulation de ceux-ci.
- Le fait de gêner le passage du courant crée une différence de tension entre les bornes de la résistance.

Parallèle du circuit électrique :

- Si l'on branche le fil + de la source de tension sur le fil -, on crée un circuit d'électrons. On peut mettre un ampèremètre pour observer le courant (à réaliser à faible tension, avec une source qui possède une limitation de courant).

Circuits à réaliser

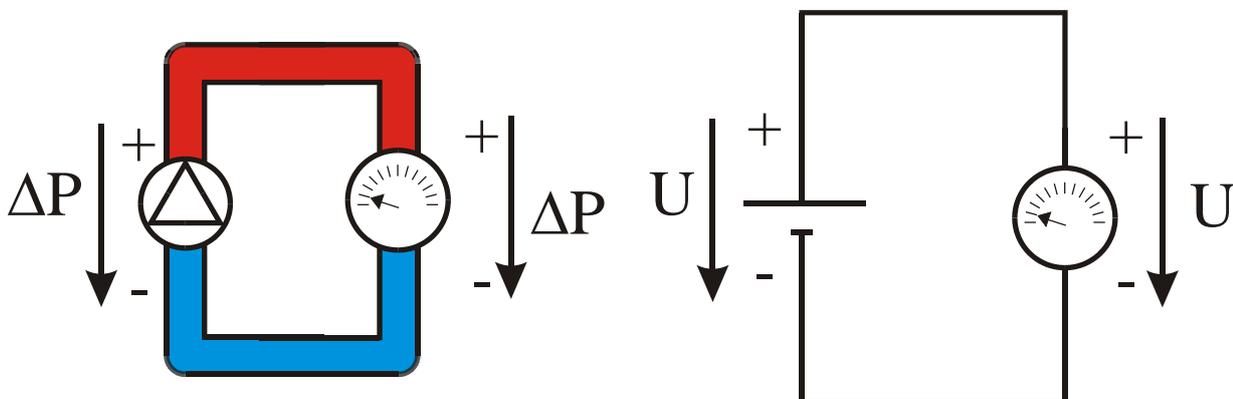
Voici quelques circuits à réaliser pour les démonstrations en classe.

Partant de l'idée qu'il est trop onéreux de fournir une maquette à chaque élève, voici l'utilisation que je propose de faire de cette maquette.

Une bonne pratique dans ces démonstrations serait de proposer le schéma au tableau de réaliser les deux circuits en parallèle (hydraulique / électrique) puis, avant d'allumer les sources, de faire proposer aux élèves des hypothèses sur ce qui va arriver lors de l'enclenchement. Ensuite seulement, vérifier par l'expérience.

Il va de soit que ce n'est pas une liste exhaustive car on va les modifier avec les élèves afin de vérifier les nouvelles hypothèses qu'ils auront émises lors de la démonstration.

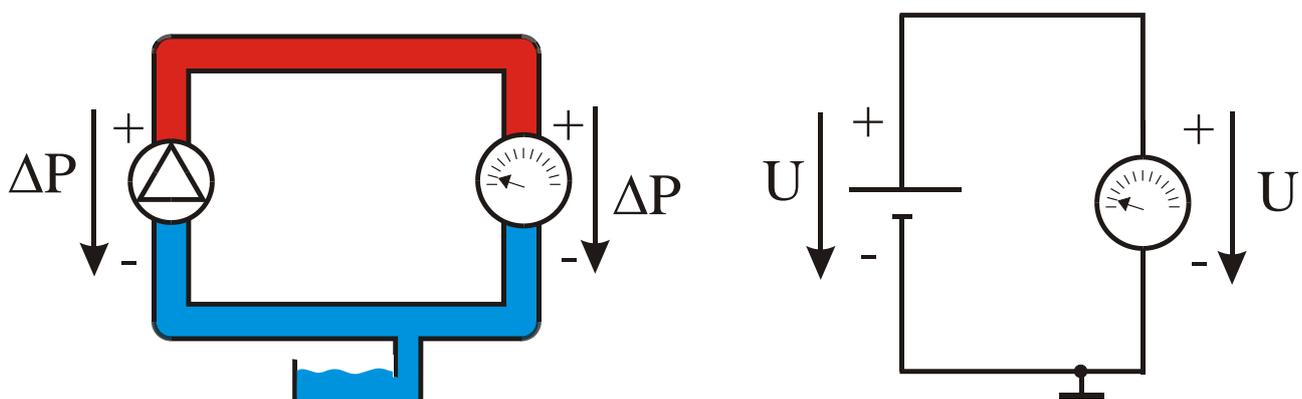
Circuit ouvert, visualisation de la tension :



On peut visualiser la variation de pression (tension) en fonction de la variation du potentiomètre de la pompe (de l'alimentation). Il est possible ensuite de dévier la discussion sur le courant en ajoutant un ampèremètre dans le circuit et constater que le courant est nul quelle que soit l'amplitude de pression (tension) donnée par la source. Les couleurs rouge et bleu délimitent les domaines haute et basse pression (tension).

Masse :

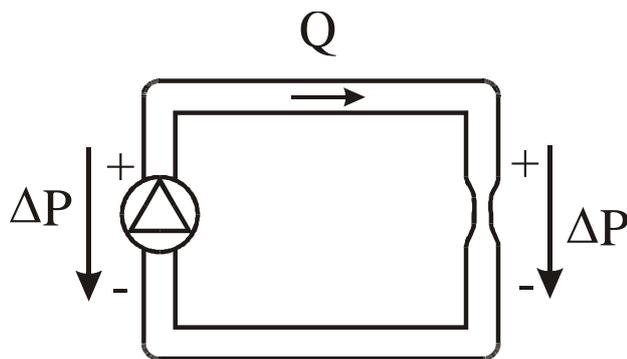
On peut encore à ce stade illustrer le rôle d'un point de masse qui doit être présent dans un circuit électrique pour fixer le potentiel de référence. Pour le circuit hydraulique, cette masse a la fonction annexe mais indispensable d'extraction des bulles d'air introduites dans le circuit (à l'occasion des branchements).



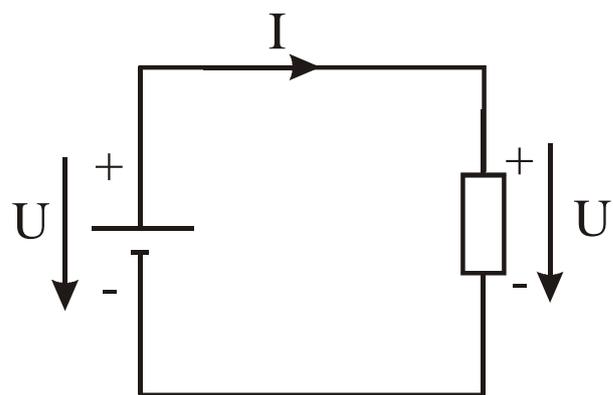
Circuit série, une seule résistance :

On peut ensuite créer un circuit source /résistance pour se familiariser avec l'analogie et mettre en évidence quelques points importants de son comportement.

Circuit hydraulique



Circuit électrique

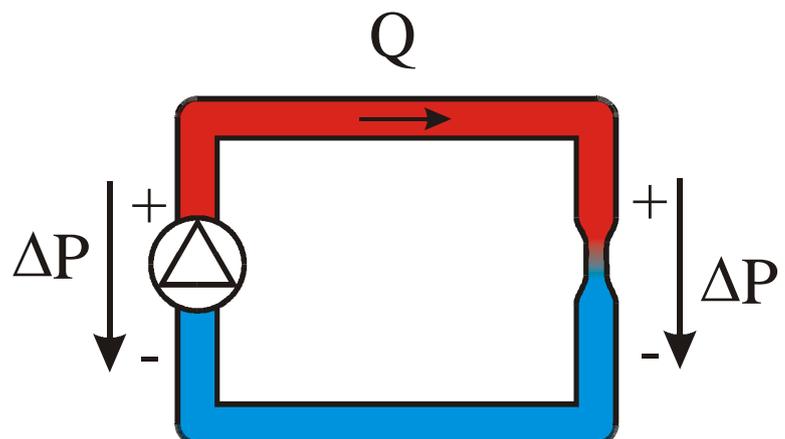


Débit (courant) :

On peut alors placer des indicateurs de flux (ampèremètre) à plusieurs endroits pour vérifier la conservation du courant le long de la boucle pour une valeur donnée de la résistance ou de différence de pression créée par la source (Première loi de Kirchoff). Les flèches de tension sont positionnées du potentiel le plus élevé vers le plus bas.

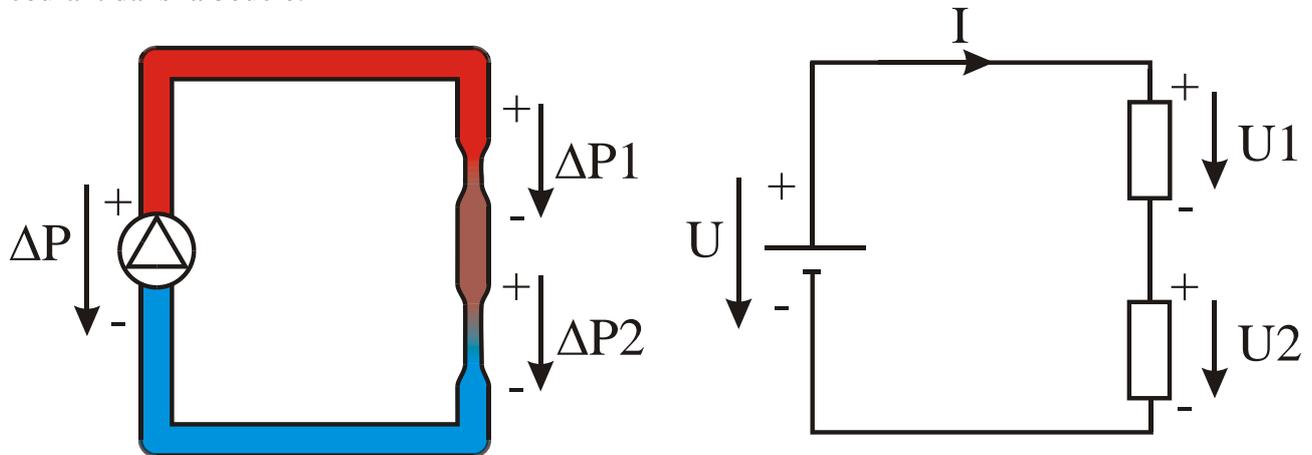
Pression (tension) :

Il est possible sur ce circuit de montrer les polarités de la pression, la différence de potentiel, ainsi que la valeur de ce potentiel en différents points du circuit, qui reste constante tant que l'on ne passe pas d'un côté à l'autre d'un des deux éléments (bleu à rouge ou rouge à bleu).



Circuit série deux résistances :

On peut ensuite passer au circuit à deux résistances, là aussi, on constatera la permanence du courant dans la boucle.



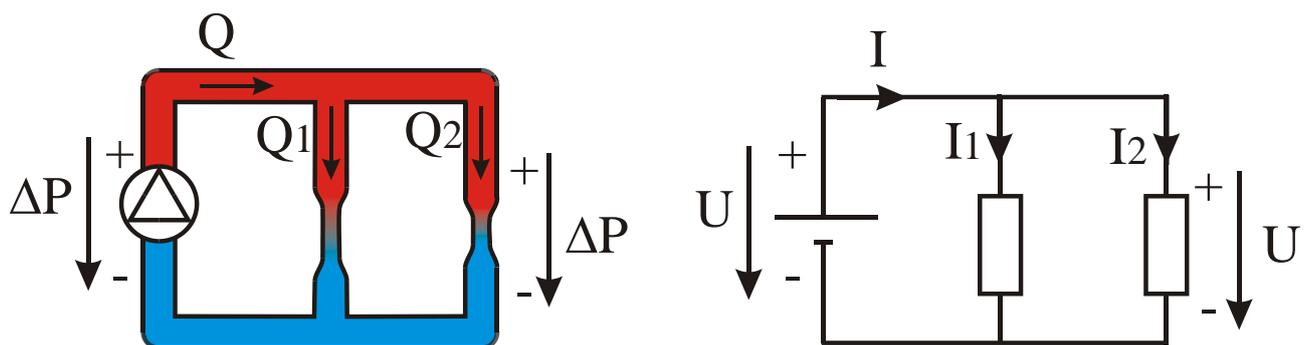
On pourra placer dans ce circuit des manomètres (voltmètres) et vérifier la deuxième loi de Kirchoff (des mailles) qui stipule que la somme algébrique (avec signe) des tensions dans une boucle fermée est toujours égale à zéro.

Lors du parcours de la boucle, on comptera les pressions (tensions) positive si on passe dans le sens de la flèche, négative dans le cas contraire.

Dans ce circuit on peut constater encore que plus la résistance est grande, plus la différence de tension est importante pour le même courant.

Circuit parallèle deux résistances :

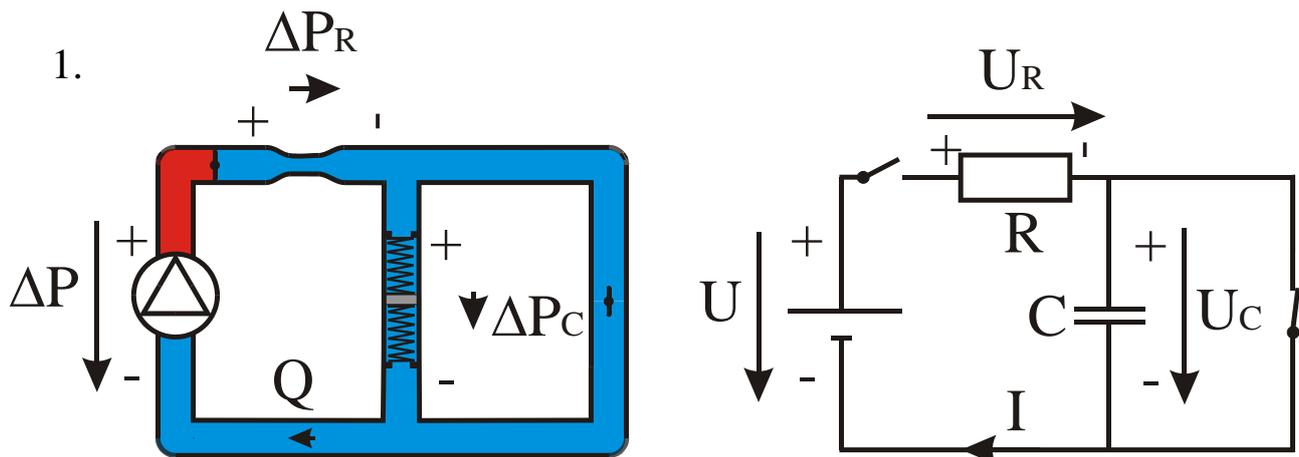
Le circuit parallèle permet de visualiser la séparation du débit (du courant) en deux parties dépendantes de la valeur de la résistance. Les couleurs mettent en évidence le fait que $U_{R1}=U_{R2}$



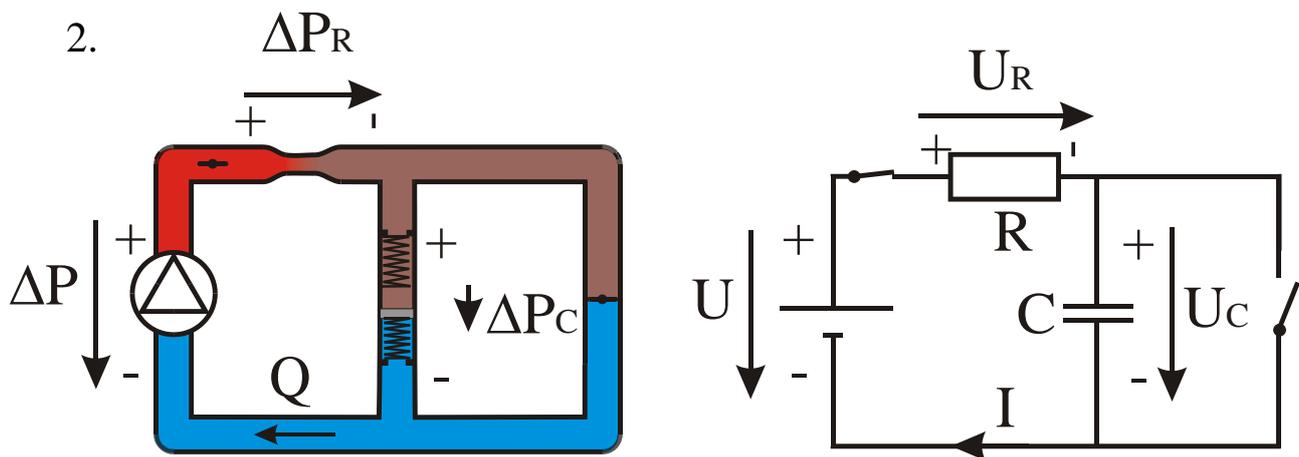
Circuit RC série :

On peut illustrer par cette démonstration la charge d'un condensateur à tension constante. L'observation du comportement du curseur du condensateur hydraulique, du débit et de la pression peut se faire alternativement au cours de plusieurs démonstrations successives.

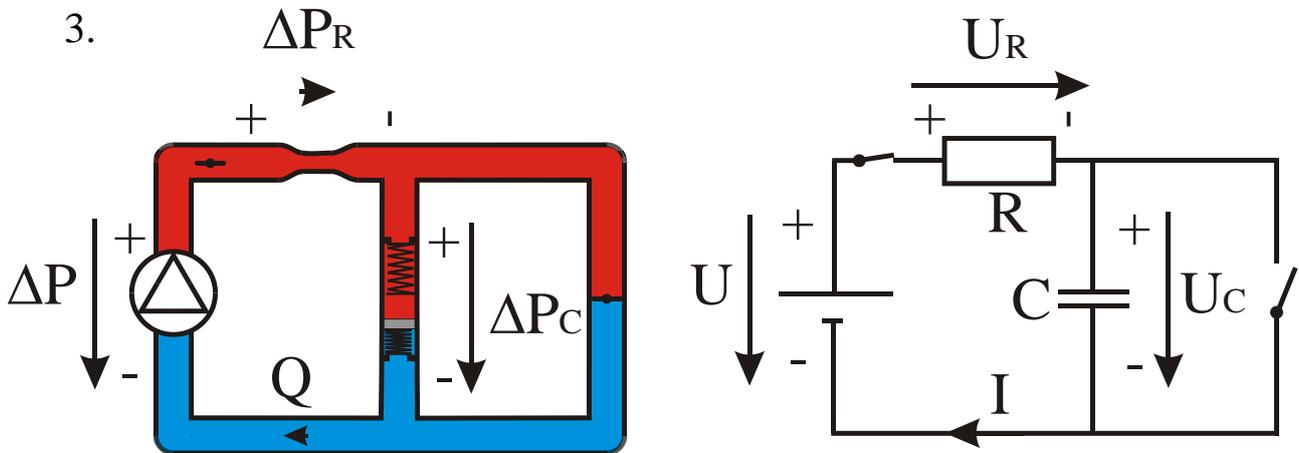
Les trois étapes de la charge sont représentées ci-après.



Première étape, la source est enclenchée, l'interrupteur d'alimentation est ouvert (vanne fermée), l'interrupteur de décharge est fermé (vanne ouverte) et la pression (tension) est répartie selon les couleurs ci-dessus.



On ouvre l'interrupteur de décharge (vanne fermée) et on ferme l'interrupteur d'alimentation (vanne ouverte). On assiste alors à la charge progressive du condensateur avec un courant (débit) non nul et par conséquent une chute de tension (pression) aux bornes de la résistance.

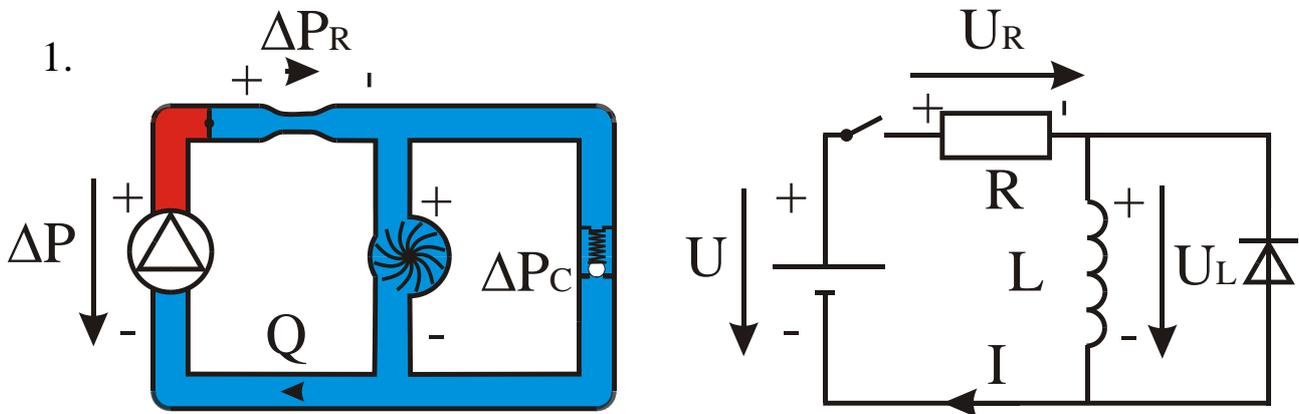


Le condensateur est entièrement chargé, le courant (débit) est alors nul et la tension (pression) entre les bornes de la résistance est également à zéro.

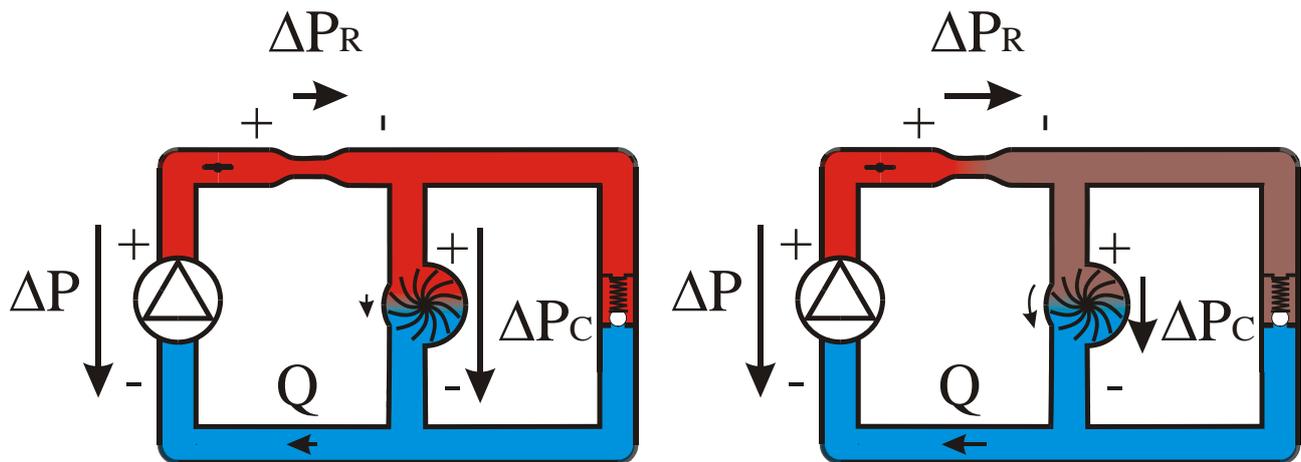
On peut alors inverser les deux interrupteurs et recommencer le cycle.

Circuit RL série :

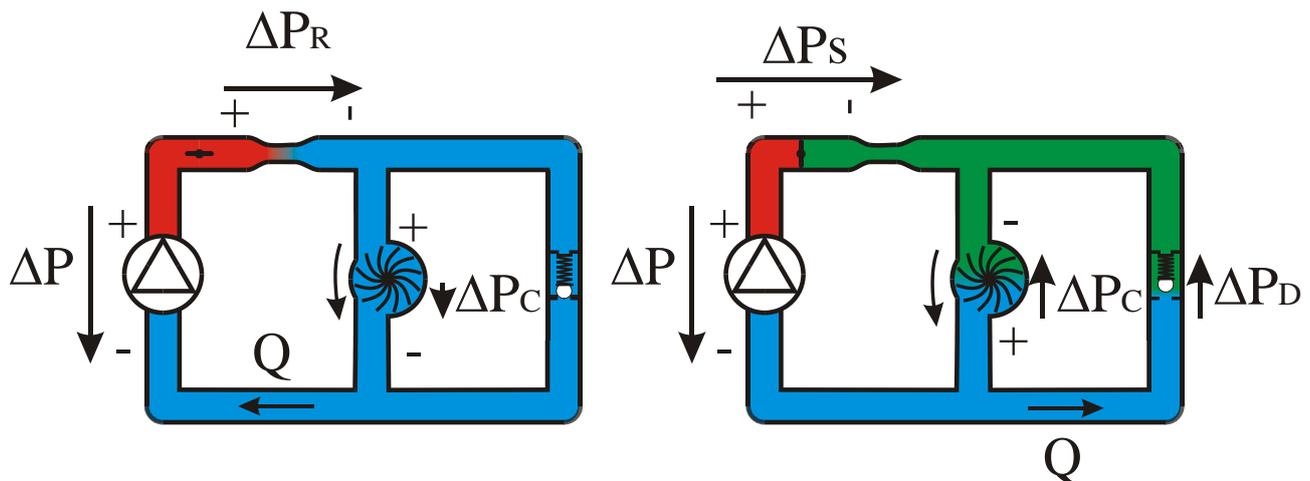
Démonstration du comportement d'une self dans un circuit RL série avec diode de roue libre.



Dans un premier temps, on effectue les branchements et on allume la source de tension on a la pression de la source aux bornes de l'interrupteur, aucun courant dans les conducteurs et pas de tension dans le reste du circuit. La diode est bloquée.



Au moment où on ouvre l'interrupteur, la self est déchargée (arrêtée) et elle va commencer à se charger (tourner). On voit alors croître le courant dans le circuit. La tension aux bornes de la résistance croît comme le courant et la tension aux bornes de la self décroît de la même manière. La diode est toujours bloquée.



Pour finir, on a toute la tension aux bornes de la résistance et plus rien aux bornes de la self qui est complètement chargée (tourne à pleine vitesse). Le courant n'est alors plus limité que par la résistance.

Si on ferme l'interrupteur, on va voir la self se transformer en générateur pour que le courant continue de circuler. La tension aux bornes de celle-ci s'inverse et comme l'interrupteur interdit toute circulation du côté de la source, le courant va s'écouler à travers la diode (soupape). Cette diode s'appelle diode de « roue libre » et avec l'image de la self qui tourne, on comprend bien pourquoi.

La tension aux bornes de l'interrupteur est alors la somme des deux tensions, de diode et de source.

A noter que si on ne place pas une branche de circuit auxiliaire avec diode de roue libre, on va voir apparaître une très forte surtension (surpression) aux bornes de l'interrupteur lors de l'ouverture de celui-ci (fermeture de la vanne).

Extension vers l'alternatif :

Suite à ces discussions, on peut dévier vers ce qui se passerait en alternatif, en basse fréquence :

- Le condensateur a le temps de se charger (grande excursion du piston) dans un sens et dans l'autre à un point où les ressorts opposent une grande contre-pression au passage du courant.
- La self a le temps de « se lancer » dans un sens et dans l'autre ce qui oppose que peu de résistance à l'eau.

En alternatif à haute fréquence :

- Le piston du condensateur bouge très peu dans un sens et dans l'autre, le ressort se comprime donc très peu et n'oppose presque pas de résistance au passage alterné de l'eau.
- La masse d'inertie de la self n'a pas le temps de bouger beaucoup et limite ainsi fortement le passage du courant.

Questionnaire d'évaluation

Une démonstration du modèle hydraulique a été faite en classe et pour améliorer l'utilisation de cette maquette, je vous demande de noter ci-après vos impressions sur cette leçon.

Analogie hydraulique :

- Je connais cette analogie depuis un certain temps, cette démonstration d'apporte rien de plus.
- J'ai découvert de nouvelles relations électrique-hydraulique grâce à la maquette.
- J'ai découvert beaucoup de nouvelles correspondances lors de cette leçon.
- Je ne connaissais pas cette analogie et je l'ai découverte au cours de cette leçon.

Présentation de l'analogie:

- La présentation de la maquette a été géniale.
- C'était une bonne présentation mais on pourrait l'améliorer.
- La présentation n'était pas très claire, un gros effort à faire pour améliorer la clarté.
- Je n'ai pas compris le rapport entre ces tuyaux et les circuits électriques.

Manipulation par les élèves :

- La maquette est facile à utiliser, on peut essayer différents schémas sans problème
- On peut faire des changements dans le circuit, mais il y a des problèmes pratiques
- La manipulation est laborieuse et on a de la peine à concrétiser une idée de circuit
- Je n'arrive pas à utiliser cette maquette.

Intérêt des éléments de la maquette :

1:très intéressant 2:intéressant 3:peu d'intérêt 4:à supprimer	1	2	3	4
Source de tension (pompe)_____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Conducteurs (tuyaux)_____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Point de masse_____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Interrupteur (vanne)_____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Résistance_____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Condensateur_____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Inductance_____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Diode (soupape)_____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Source alternative_____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Voltmètre_____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ampèremètre_____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Documentation d'accompagnement :

- La documentation est très bien faite et couvre tous les sujets traités.
- Il y a des lacunes dans les documents donnés.
- Il manque beaucoup de choses dans ce que nous avons reçu.
- Tout est à faire.

Résultat du questionnaire d'évaluation :

J'ai pu tester la maquette durant une semaine. Elle comprenait à ce moment les éléments suivants :

- Source de tension
- Tuyaux
- Point de masse
- Interrupteur
- Résistance
- Condensateur
- Voltmètre
- Ampèremètre

Les autres (Inductance, diode, source alternative) n'étaient présentés que sous forme de dessins.

Une documentation de deux pages a été donnée aux élèves lors de cette démonstration, il s'agit des pages en annexe, une montrant le principe de l'analogie ($U=P$, $I=Q$) et l'autre qui contient les quatre images de composants à savoir Résistance, Condensateur déchargé, Condensateur chargé, Inductance.

Les classes concernées étaient les suivantes :

- Electroniciens maturité troisième année.
- Electroniciens CFC troisième année.
- Automaticiens, techniciens ET première année.
- Electroniciens CFC deuxième année.
- Electroniciens CFC première année.

Cette maquette constitue une bonne approche pour le début de la formation, mais n'ayant pas d'autres classes de première année à mon horaire, je n'ai pas pu la tester sur un échantillon plus large d'élèves et le temps (une semaine dès la réception du condensateur) n'était pas suffisant pour impliquer des collègues.

Pour avoir une idée grossière du ressenti des élèves par rapport à cette maquette, le questionnaire des deux pages précédentes a été passé dans la classe après la démonstration.

45 élèves ont répondu au questionnaire, presque tous ont mis des croix dans les cases d'évaluation, et quelques-uns des remarques au dos de la feuille.

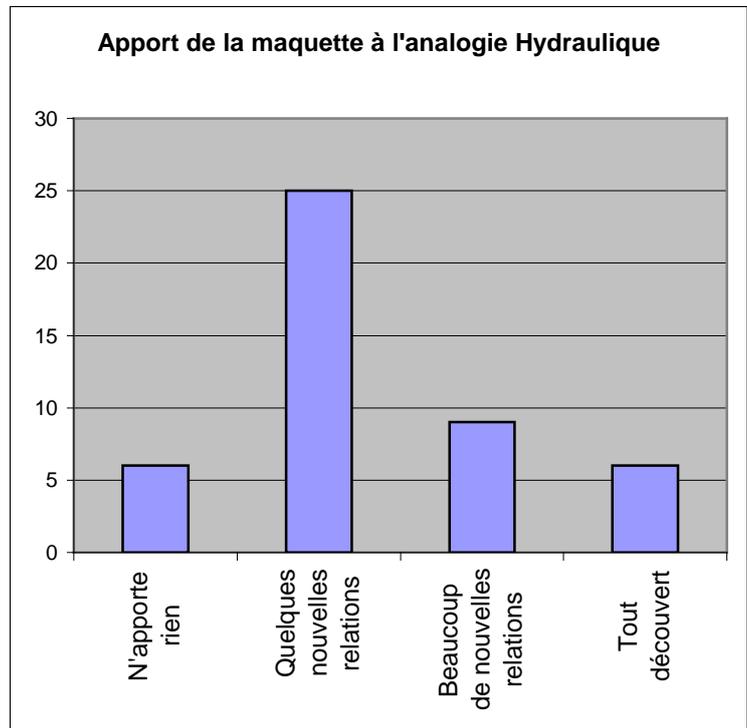
Les résultats figurent sur les pages suivantes.

Analogie

La première question que je me posais était de savoir dans quelle mesure les élèves avaient déjà eu vent de cette analogie et quel apport une telle présentation pouvait constituer pour eux alors que la majorité de mes classes a déjà un vécu important dans notre école.

Quelle ne fut pas ma surprise de découvrir que certains élèves n'avaient jamais entendu parler de l'analogie hydraulique, et pas seulement dans les premières années.

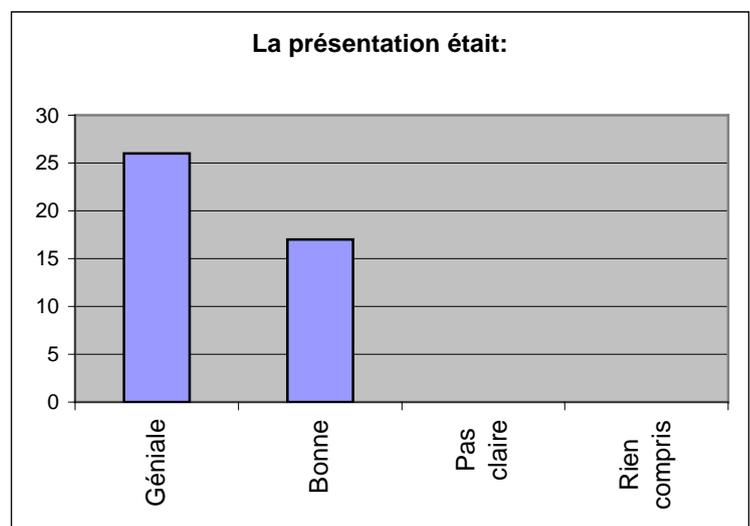
Pour la plupart, c'était du connu mais de nouvelles relations entre électricité et hydraulique ont vu le jour. (à mettre en parallèle avec la dernière question cf la suite.)



Présentation :

Un deuxième souci était de savoir si le « show » prenait ou si cette démonstration tombait à plat.

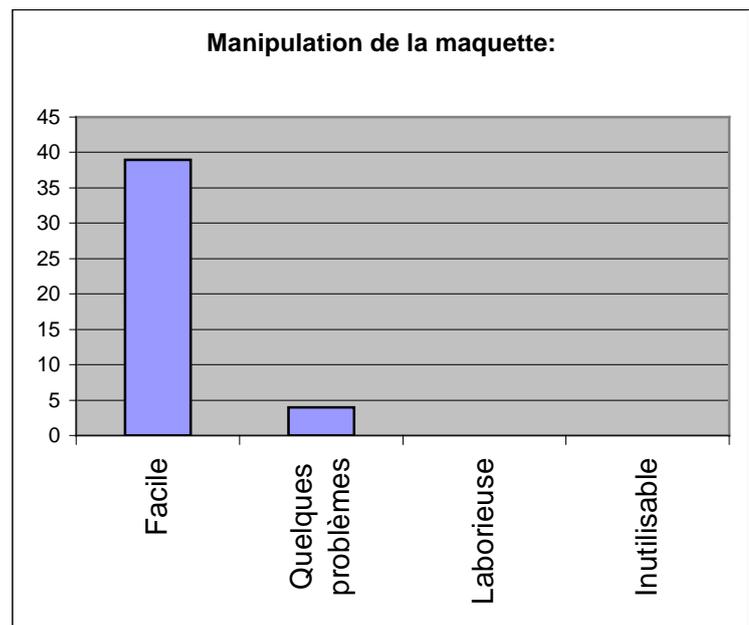
Ici, une bonne impression, j'ai mis à dessein le terme relativement fort « géniale » qui a été choisi par la majorité des élèves.



Manipulation :

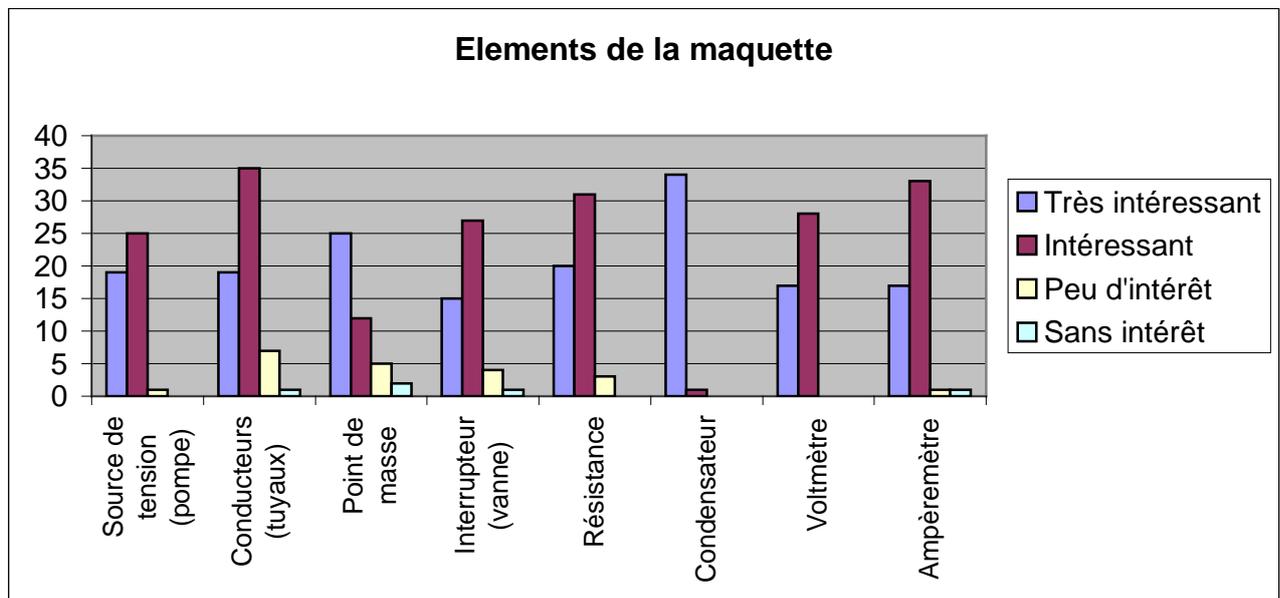
Une autre question concernait la manipulation de la maquette par les élèves. Il me paraît en effet primordial de laisser les élèves faire et défaire les circuits quitte à ce que certains n'aboutissent à rien de fonctionnel, car c'est là que se posent les bonnes questions.

OK, quelques problèmes, notamment dus à l'instabilité du pot constituant le point de masse et un problème de joint du condensateur au début de la semaine. Correspond aux attentes.



Éléments de la maquette :

Restait à savoir sur quel élément de la maquette les élèves focalisaient leur attention et lequel (lesquels) leur apportait le plus de « connaissance ajoutée ».



Indubitablement, la star est le condensateur. Je n'ai tenu compte que des éléments qui étaient physiquement réalisés, mais ceux qui ont mis une croix sur la ligne de la self avait également tous un avis très favorable.

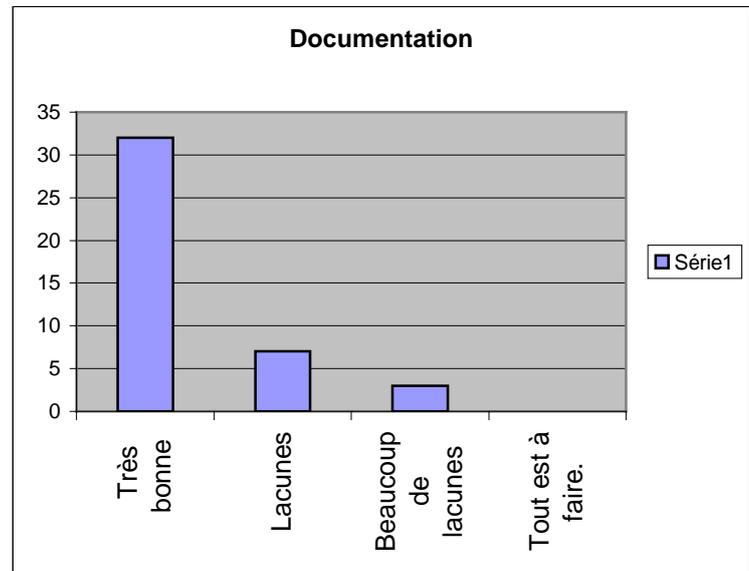
Je remarque également que même les conducteurs (tuyaux) recueillent leur lot d'avis favorables comme quoi tous les éléments profitent de l'effet de surprise à savoir de l'eau et des tuyaux dans un cours d'électricité.

Documentation :

Une question pour les documents joints à la démo. Ici, les élèves auraient voulu aussi obtenir des images des éléments tels que source alternative, diode ou autre.

J'avais limité les illustrations fournies à ce qui pour moi est l'essentiel, soit Résistance, Inductance et Condensateur.

Je ne suis pas convaincu que de fournir d'autres modèles seraient d'un grand secours pour mes élèves, à voir.



Apport à l'électricité :

Pour ne pas perdre de vue l'essentiel, une question (peut-être un peu trop générale) pour rendre compte des discussions très fournies que nous avons eues autour de cette maquette, en particulier avec les premières années. De mon avis, les réponses auraient été encore largement plus favorables au cas où la self avait été disponible pour la démonstration.

Sur les 36 élèves qui ont répondu à cette question (au dos de la feuille, erreur tactique) **26 affirment avoir appris quelque chose** sur les circuits électriques. Ce nombre important signifie bien qu'une telle démonstration n'intéresse pas que les premières années mais tous les élèves de toutes les années. Tous sont susceptibles de retirer quelque leçon de cette présentation.

Remarques manuscrites :

Voici la transcription des quelques remarques relevées au dos de mon questionnaire. Mes commentaires en italique suivent les remarques.

Analogie:

Ajouter diode, transistor, self

 améliorer voltmètre

Ces remarques relèvent de l'aspect inachevé de la maquette actuelle, les améliorations viendront.

Manipulation:

Tuyaux plus longs

J'ai réalisé des tuyaux de faible longueur pour limiter la place utilisée lors des démonstrations.

Elements de la maquette:

Tuyaux transparents

Couleurs pour instruments, résistances, condo, ...

Plus d'exemples, d'éléments

Cool et simple d'utilisation

Les tuyaux transparents n'apportent rien à la démonstration car on ne verrait pas le passage de cette eau à sauf si l'on ajoute un liquide non miscible coloré dans l'eau pour figurer les électrons, mais il devient difficile alors d'expliquer à quoi correspond l'eau.

Documentation:

Bien faite

1 Documentation par module.

Le nombre de pages limité de la documentation fournie est voulu pour éviter la dispersion de l'information et la surcharge des cartables.

Autre:

Manomètres ne sont pas précis

Couleur de l'eau pour voir le flux.

Créer des portes logiques.

Montrer aux élèves de première année

Dimensionnement.

Plus de modules.

Pour la précision, l'élève fait allusion à un manomètre qui est tombé et dont l'aiguille s'est déplacée sur son axe.

La couleur de l'eau n'apporte rien si l'on ne trouve pas une coloration qui permette de voir un déplacement de particules, on pourrait imaginer l'utilisation d'un liquide non miscible coloré qui constitue des particules colorées dans l'eau, encore faut-il donner une signification à ces particules (symbolisation des électrons qui se déplacent dans le conducteur) et à l'eau (?).

L'extension du modèle à d'autres éléments (logiques) n'est pas à l'ordre du jour. Le principal est fait et l'utilité d'une telle extension est à évaluer. Je ne crois pas que ce modèle bien que d'utilisation très large ne se prête à la modélisation de n'importe quel élément électrique et de plus il ne faut pas rester prisonnier du proverbe « quand on n'a qu'un marteau tout problème est un problème de clou ».

Il est clair que des « première année » vont plus profiter de ce genre de démonstration bien qu'elle ne soit pas dénuée d'utilité pour les années suivantes comme l'a montré le questionnaire d'impact.

Documents papier (transparents) :

J'ai réalisé une série d'images de synthèse qui permet de présenter l'analogie aux élèves sans disposer du modèle « hardware » ou en complément de celui-ci. Il y a là une présentation des relations entre les grandeurs, le dessin d'une résistance, d'un condensateur déchargé, d'un condensateur en charge, d'une self et un résumé à distribuer aux élèves comportant ces 4 éléments.

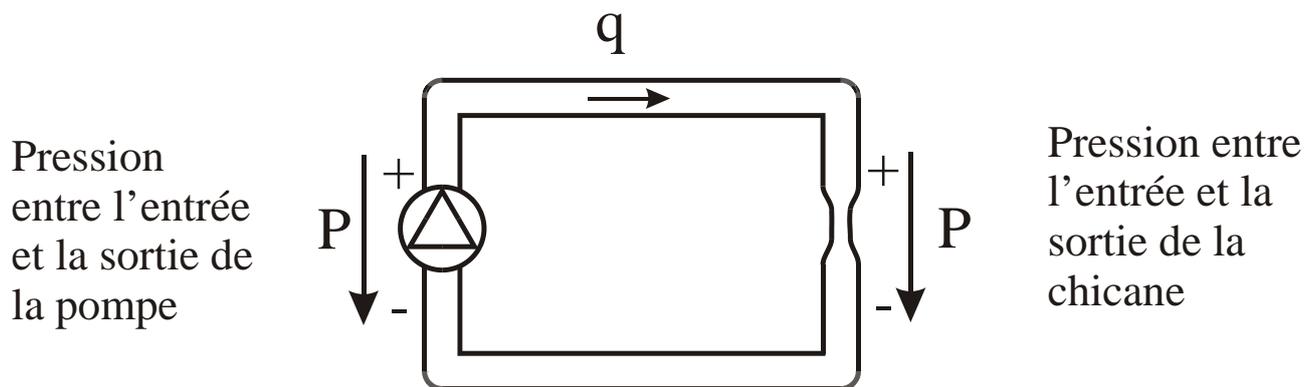
Pour ma part, j'ai donné à mes élèves la première (principe de l'analogie) et la dernière (résumé des 3 éléments) de ces illustrations.

Il y a en outre plusieurs réalisations de circuits à présenter sous forme de transparents pour mettre en évidence la configuration débit-pression (courant-tension) dans plusieurs topologies de circuits.

Analogie hydraulique - électrique

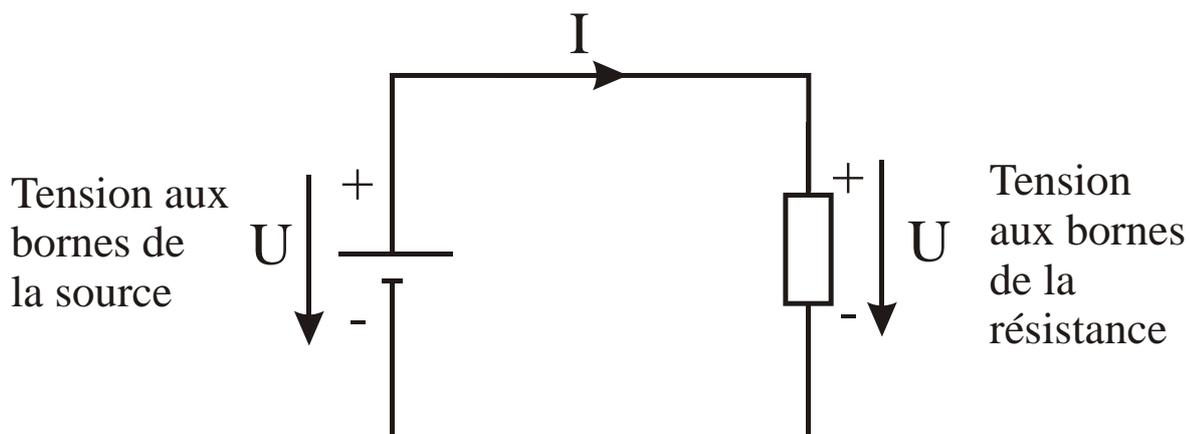
Circuit hydraulique

Débit d'eau dans le circuit



Circuit électrique

Courant dans le circuit



Analogie hydraulique

La résistance

Symbole électrique

Tuyau
vu en coupe



Etranglement

Débit d'eau

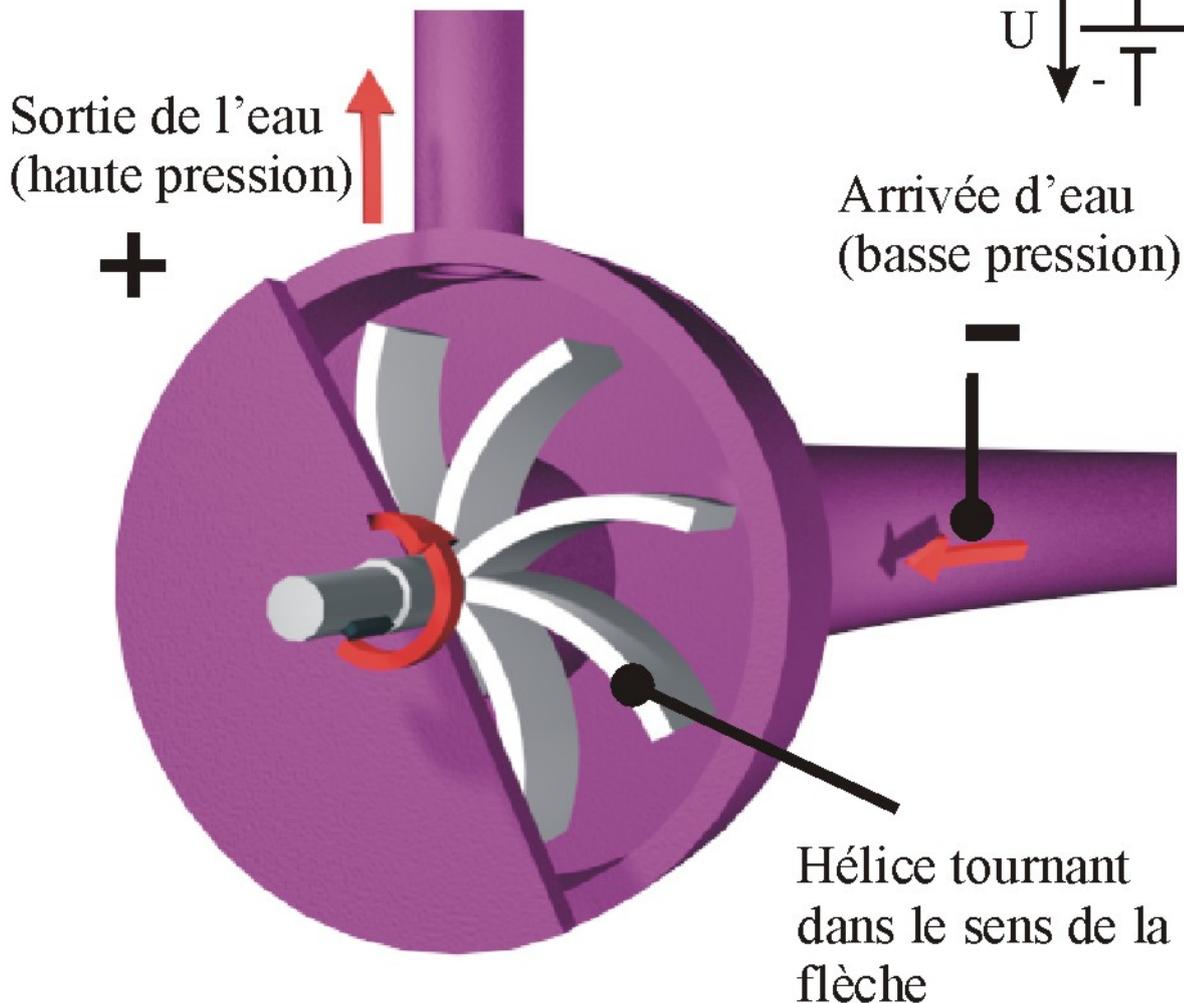


Il va apparaître une différence de pression de part et d'autre de l'étranglement

Analogie hydraulique

La source de pression (tension)

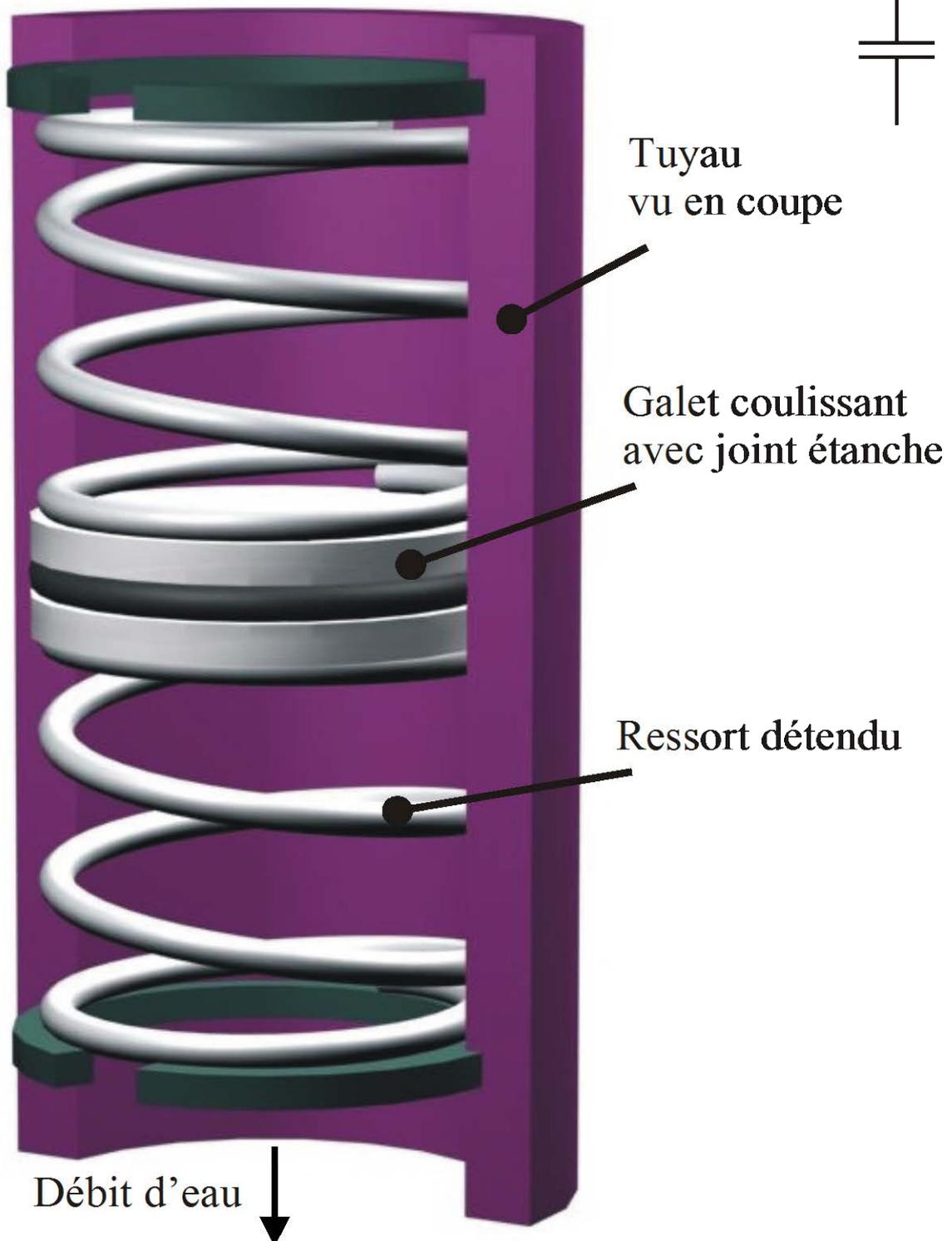
Symbole électrique



Il va apparaître une différence de pression entre l'arrivée d'eau et la sortie de l'eau. Cette différence dépend de la vitesse de rotation et reste fixe pour n'importe quel débit.

Analogie hydraulique
Le condensateur (capacité) déchargé

Symbole
électrique

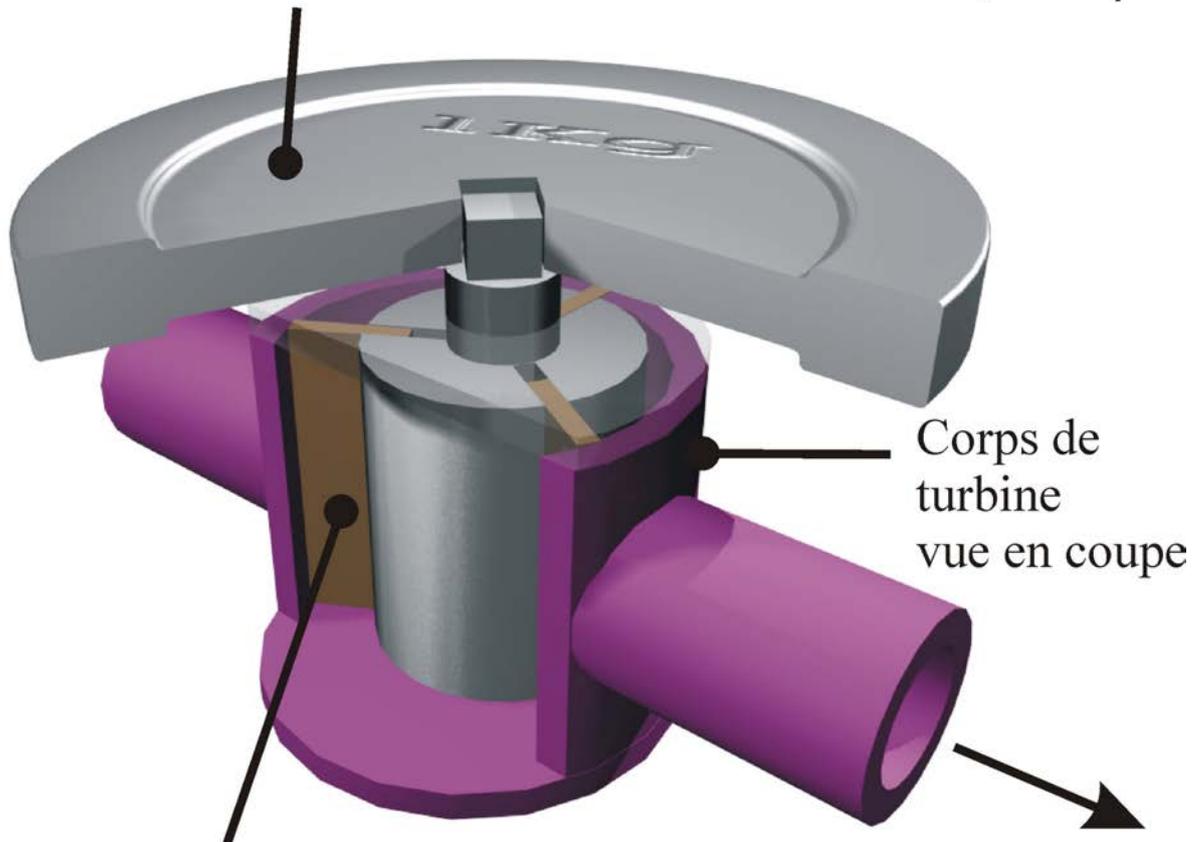
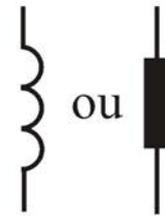


Analogie hydraulique

Symbole électrique

La self (bobine)

Masse d'inertie
vue en coupe

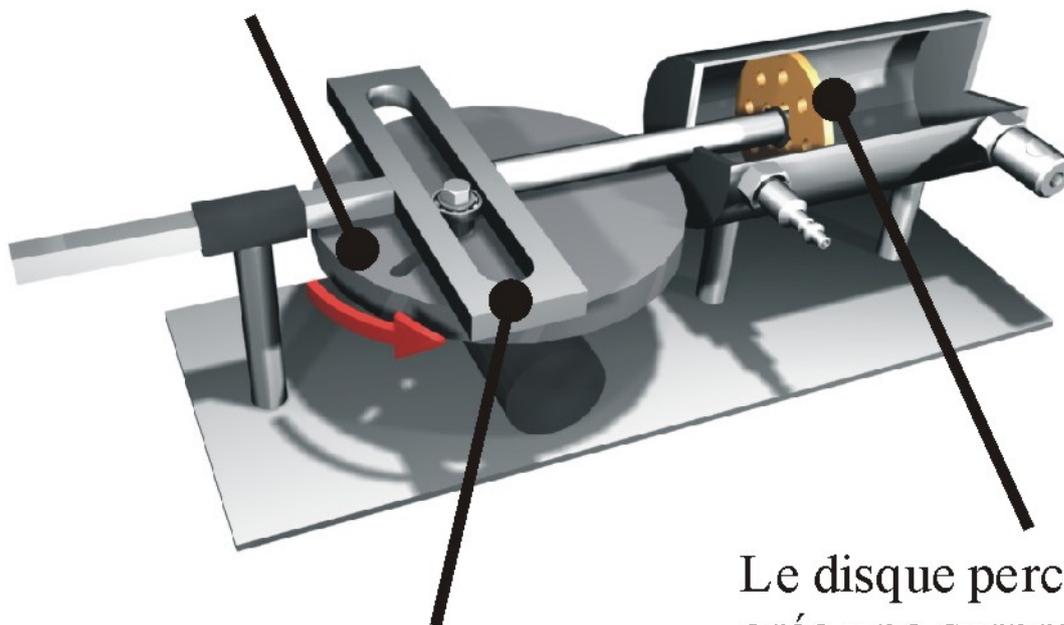
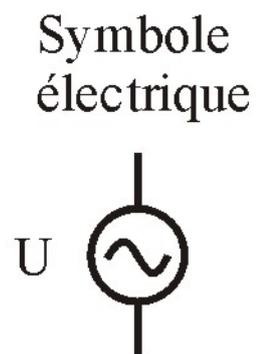


Pales de la turbine, il faut qu'elles tournent pour que l'eau passe à travers la turbine.

Analogie hydraulique

La source alternative

Le disque tourne
dans le sens de la flèche



Le galet dans le fraisage
créé un mouvement sinusoïdal
de l'axe

Le disque percé
créé une surpression
(et une dépression)
à chaque va et vient

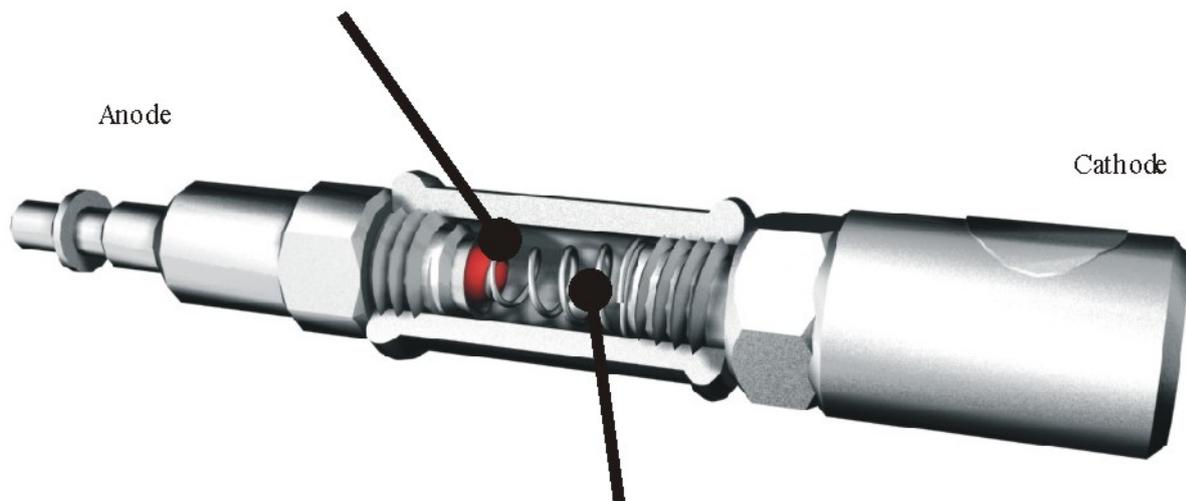
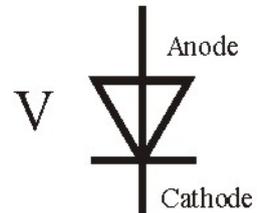
On varie la fréquence en variant la vitesse de rotation
et l'amplitude en variant la position du galet sur le disque

Analogie hydraulique

La diode (soupape)

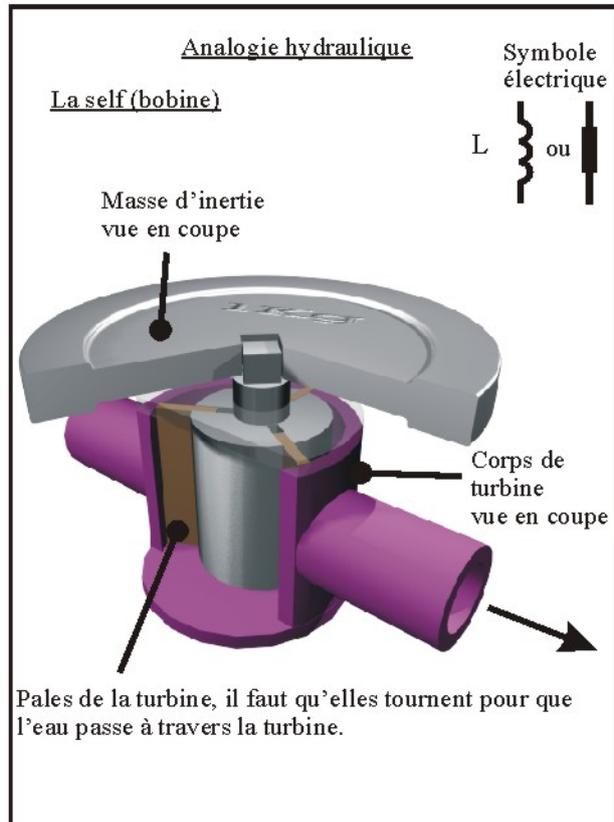
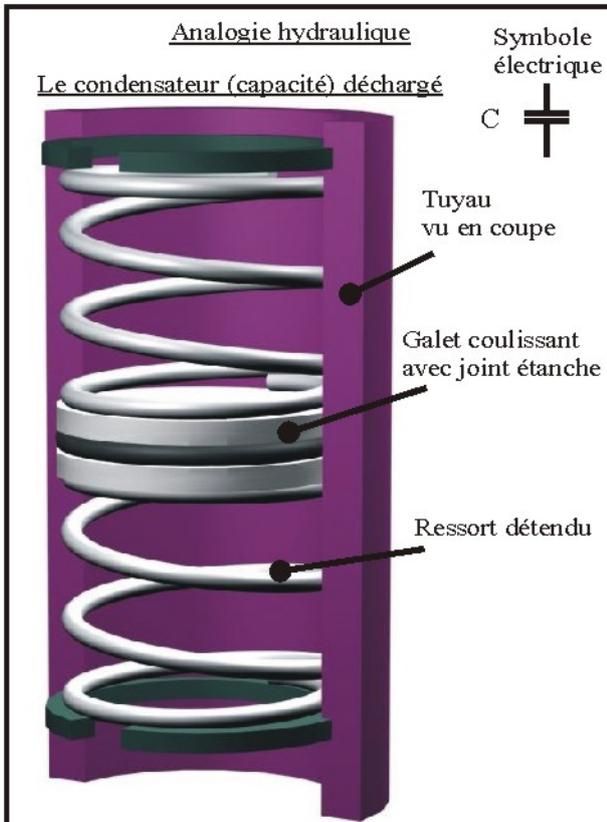
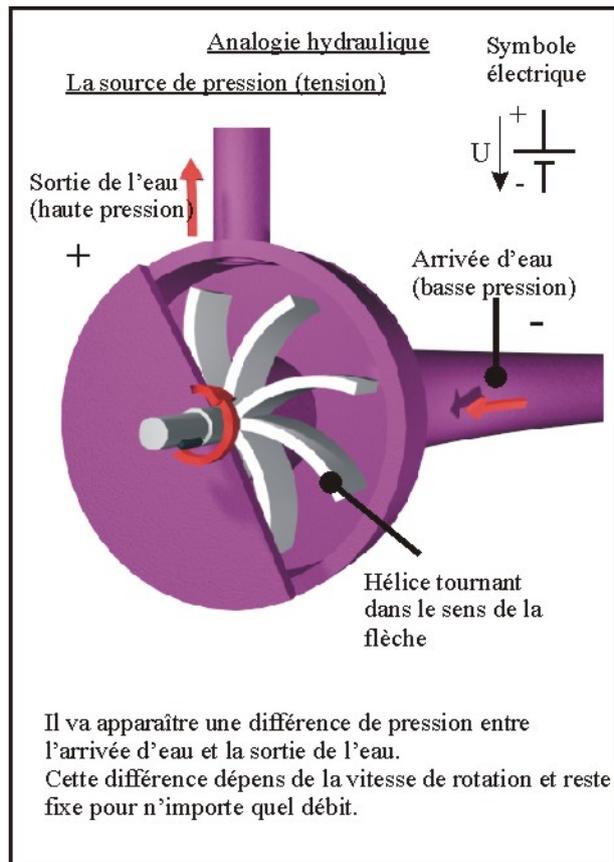
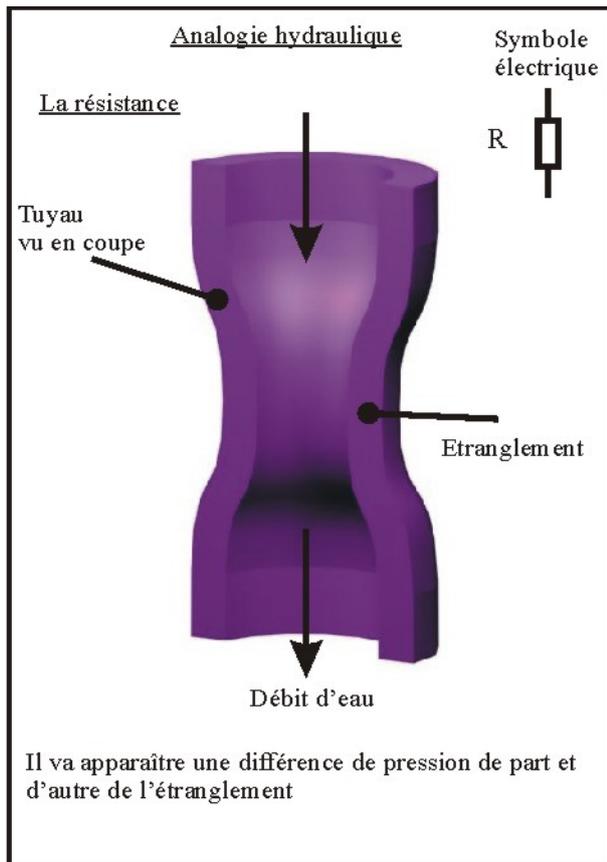
Une sphère bouche le trou
dans le sens de blocage

Symbole électrique

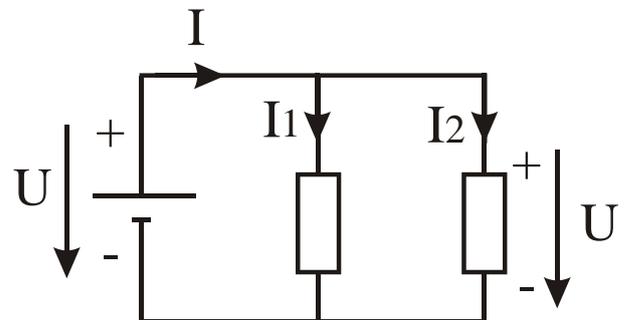
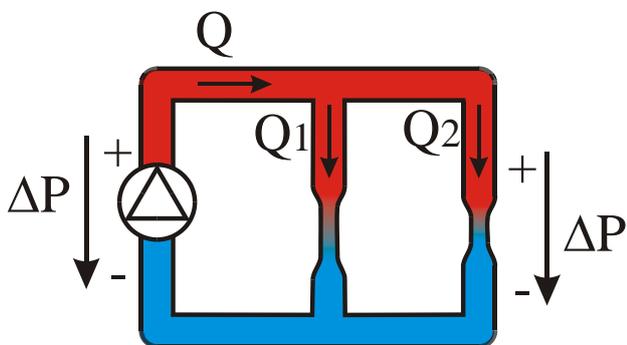
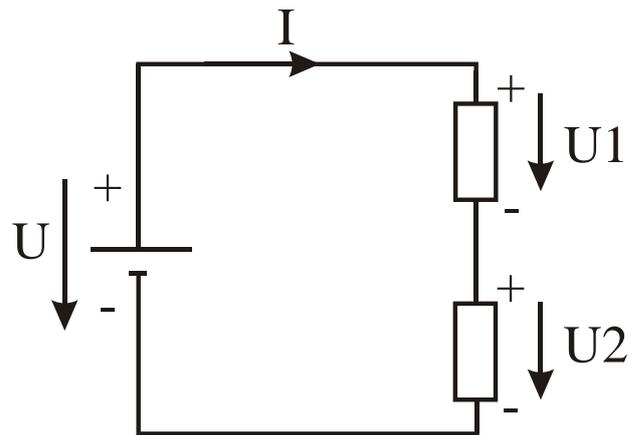
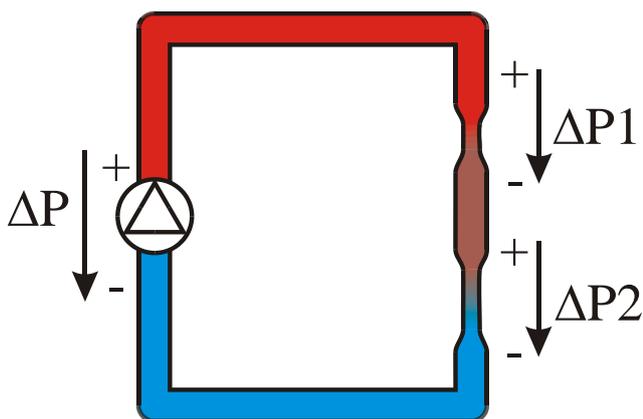
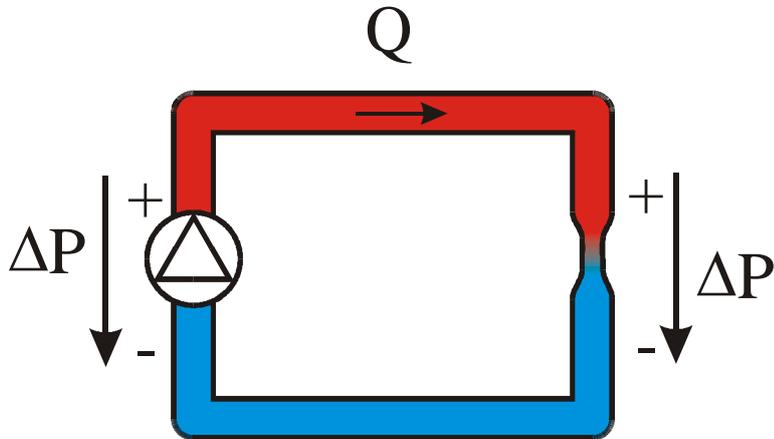


Un ressort appuie la sphère
pour obtenir une chute de
pression dans le sens passant
de 0.7 bar

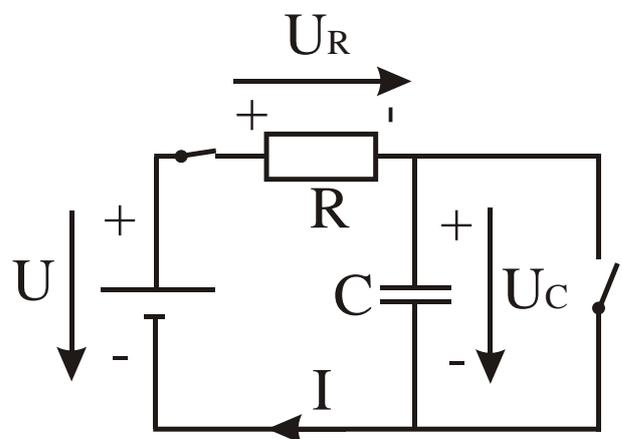
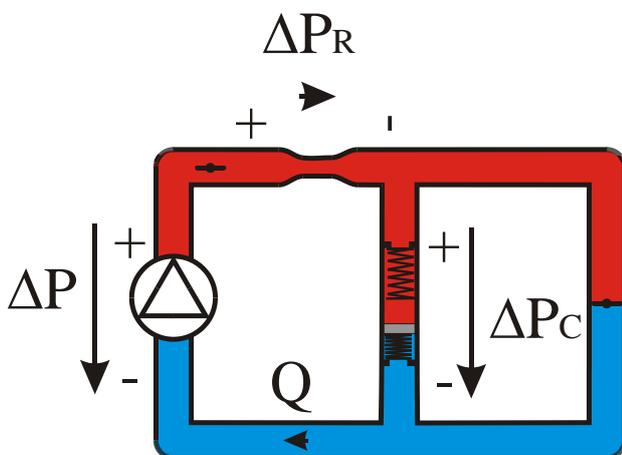
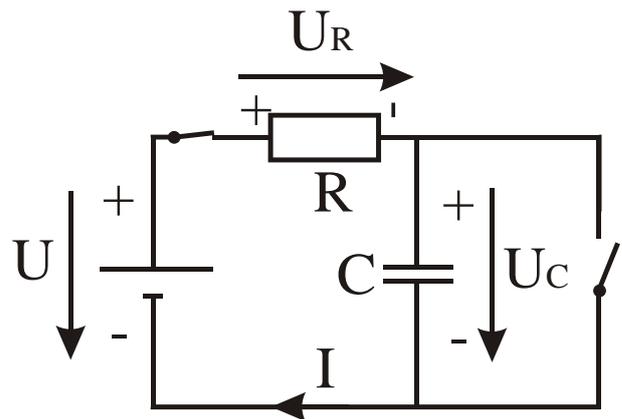
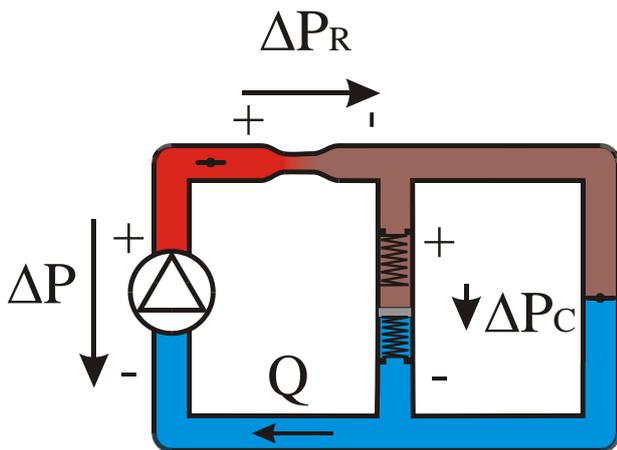
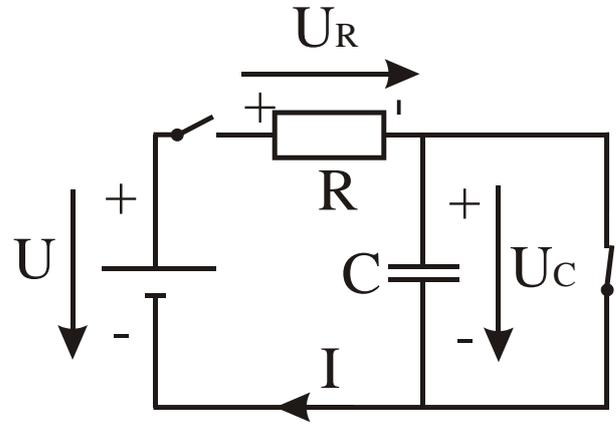
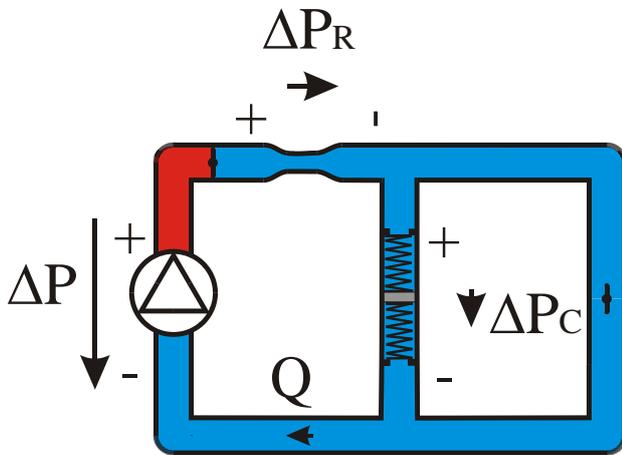
On peut voir ici comme dans les vraies diodes que
lors du blocage, il y a un petit mouvement inverse
(remise en place de la sphère) qui simule les charges de
recouvrement.



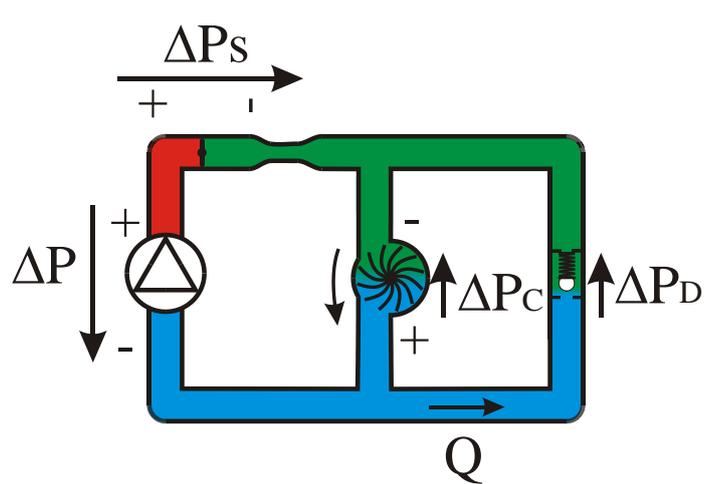
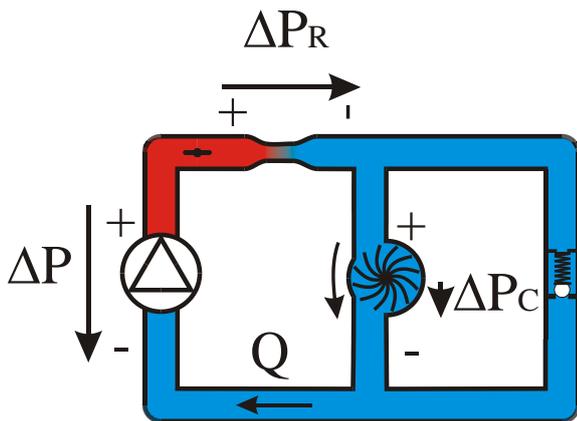
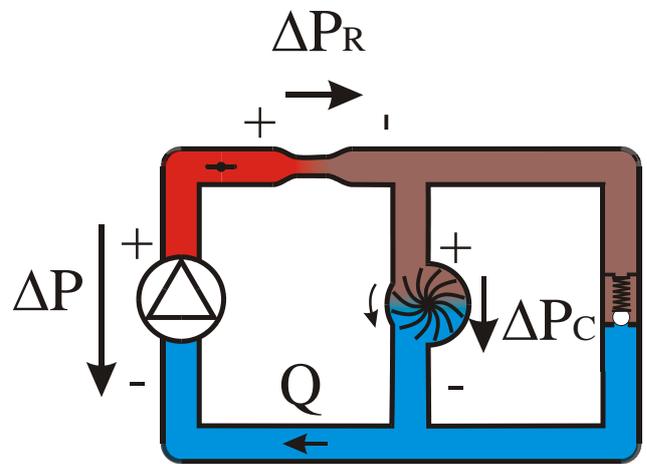
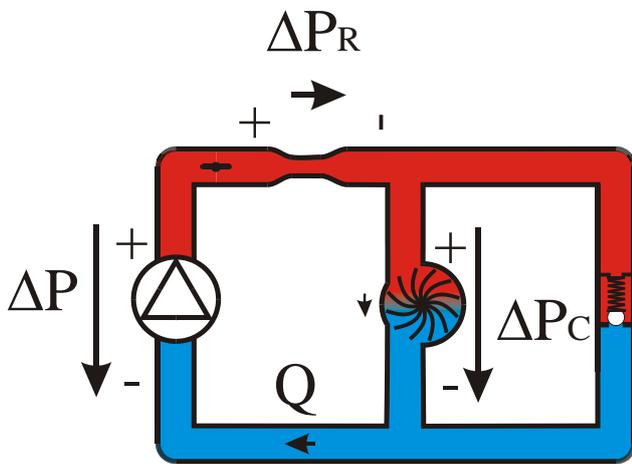
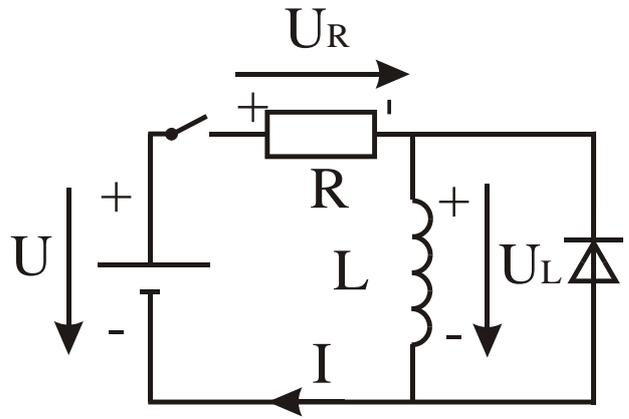
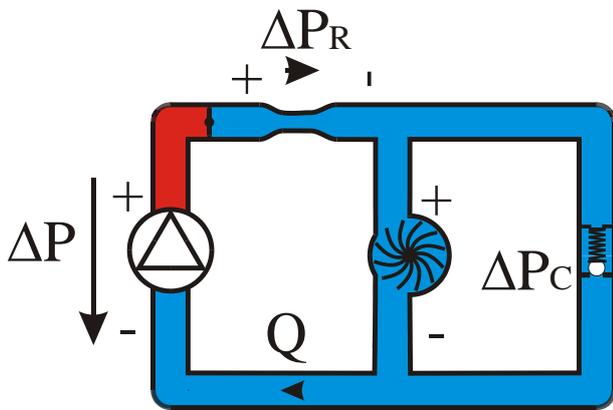
Circuits résistifs



Circuit RC série



Circuit RL série.



Conclusion

Modèle hydraulique:

Lorsque je me suis lancé dans l'étude d'un modèle pour l'électrocinétique, j'avais une idée relativement précise des éléments à réaliser et j'avais l'intuition que ce modèle pourrait aider mes élèves dans leur compréhension du comportement des grandeurs électriques.

J'ai vu grâce aux quelques présentations en classe que ce modèle a un grand succès auprès des élèves, que l'on pouvait mettre sur le tapis quelques idées sur l'électrocinétique et évaluer leur correspondance avec le modèle hydraulique.

Certains professeurs d'autres écoles se sont montrés également très intéressés par cette maquette et je me réjouis de leur fournir le résultat de mes travaux.

Mes discussions avec des élèves des classes avancées, ou avec d'autres professeurs, m'ont renforcé dans ma conviction que même après un cursus en électricité avancé, il est toujours intéressant de confronter ses idées par le truchement d'une maquette pour ainsi mettre en évidence des défauts de nos modèles internes et secouer quelques croyances bien ancrées. Ceci balaye toutes les objections que j'ai entendues (d'élèves et de profs) m'expliquant que ce n'était utile que pour les premières années, au début de leur cursus.

Il est aujourd'hui bien clair par contre que l'exposition des élèves à un modèle tridimensionnel ne les fait pas abandonner de suite leurs anciennes constructions internes, mais que ce processus demande une maturation et plusieurs réexpositions pour mettre en place une nouvelle structure correspondant mieux aux lois de la physique. Le modèle tel que construit a, par contre, un fort impact émotionnel (voir questionnaire d'évaluation du modèle) et m'a surpris par l'aisance avec laquelle il a fait tomber les barrières psychologiques que les élèves mettent habituellement devant eux pour se protéger d'une information susceptible de les faire évoluer (évolution = effort = pas envie).

De plus, pour les débutants en tout cas, la construction d'un tel modèle permet de rendre compte du comportement des électrons dans un circuit où ils retrouvent certaines de leur marques. (de l'eau ne « disparaît » pas si elle suit un parcours dans un tuyau, alors que des électrons, on ne sait pas trop....)

Ceci permettra, je l'espère, de diminuer un tant soit peu les causes d'erreurs dans des circuits élémentaires, comme par exemple le premier exercice du questionnaire sur l'électricité (Annexe I).

Réalisation pratique :

La réalisation pratique de la maquette n'est hélas pas achevée, mais en bonne voie. Les défauts résiduels sont tous assimilables à des contraintes marginales de la mécanique (frottements) que je vais encore travailler un peu pour les réduire au minimum.

Pour le reste, les manipulations sont aisées aux dires des élèves, elles sont réalisables dans une salle de classe normale si on prévoit l'équivalent d'un mouchoir pour essuyer les quelques gouttes d'eau qui s'échappent sur la table lors des branchements.

Les bulles d'air, qui m'ont créé quelques soucis au départ, ne sont plus un problème dès lors que j'ai placé un pot ouvert rempli d'eau, faisant office à la fois de référence de potentiel (masse) pour le circuit, et d'exutoire pour les bulles.

Je ferai à ce point, une remarque qui montre l'importance pour un modèle d'être le plus ressemblant possible à la réalité qu'il décrit.

Lors de mes présentations en classe j'ai expliqué qu'il subsistait quelques défauts de jeunesse dans le comportement de ma maquette et que l'on devait tenir compte de ceux-ci pour figurer le comportement réel des éléments électriques.

Par la suite, ces petites différences sont revenues à plusieurs reprises dans la discussion, et sont apparues dans le formulaire d'évaluation, comme s'il était important de relever ces petites erreurs pour diminuer la valeur démonstrative de la leçon et ainsi se laisser la possibilité de ne pas tenir compte d'éventuelles dissonances entre le modèle exposé et les modèles internes des étudiants.

Travail de mémoire :

Ce fut un grand plaisir d'effectuer un travail de mémoire sur un sujet qui me tient à cœur en même temps qu'il rende service aux autres enseignants de la branche. J'ai eu l'occasion de découvrir la littérature traitant de l'enseignement de la physique, et des notions jusque là intuitives sur les conceptions se sont trouvées confirmées.

Perspectives :

J'aurais aimé effectuer une meilleure validation de cette maquette, notamment de l'impact de la self hydraulique sur une population d'élève suffisamment large pour être représentative. Il est difficile en effet de mesurer les effets d'un outil d'enseignement en une semaine, mais si je suis conscient des limites de mon appréciation, je suis par contre conforté dans ma conviction que cette maquette apporte beaucoup au discours sur les circuits simples pour les débutants et les éléments difficiles à saisir, tels que condensateur ou inductance, pour les élèves avancés.

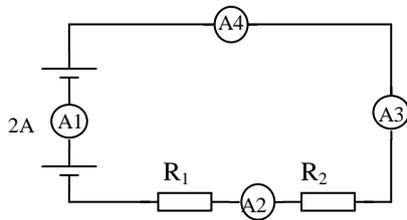
Coût :

Le coût d'une de ces maquettes ne peut être chiffré actuellement car des éléments n'ont pas encore été fabriqués et je n'ai aucune information sur leur prix de revient. Je peux par contre indiquer une valeur très approximative de 4-6 kFrs pour la maquette complète.

Annexe I : Questionnaire sur l'électricité

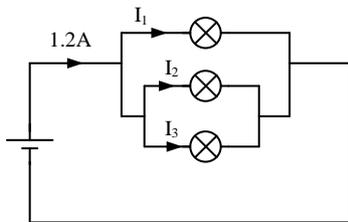
Dans le circuit suivant, R_1 et R_2 sont différentes $R_1 > R_2$.

Donner une approximation de la valeur des trois autres courants.



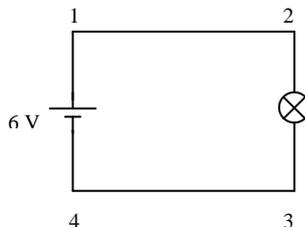
	Est plus petit que I_1	Même que I_1	Plus grand que I_1
I_2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I_3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I_4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Déterminer dans le circuit suivant la valeur des courants I_1 , I_2 , I_3 sachant que les trois ampoules sont de même type.



$I_1 =$ _____
 $I_2 =$ _____
 $I_3 =$ _____

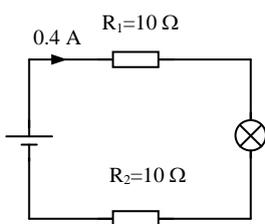
Déterminer les tensions entre les points :



1 et 2 : _____
2 et 3 : _____
3 et 4 : _____

Dans le circuit suivant, on remplace R_1 puis R_2 par des résistances de 20Ω .

Cocher les cases des affirmations correctes.



Après le premier remplacement ($R_1 = 20 \Omega$; $R_2 = 10 \Omega$)

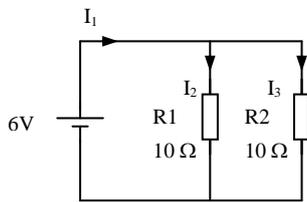
	Est plus petit	Reste le même	Est plus grand
I_{R_1}	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I_{R_2}	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Après le deuxième remplacement ($R_1 = R_2 = 20 \Omega$)

	Est plus petit	Reste le même	Est plus grand
I_{R_1}	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I_{R_2}	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

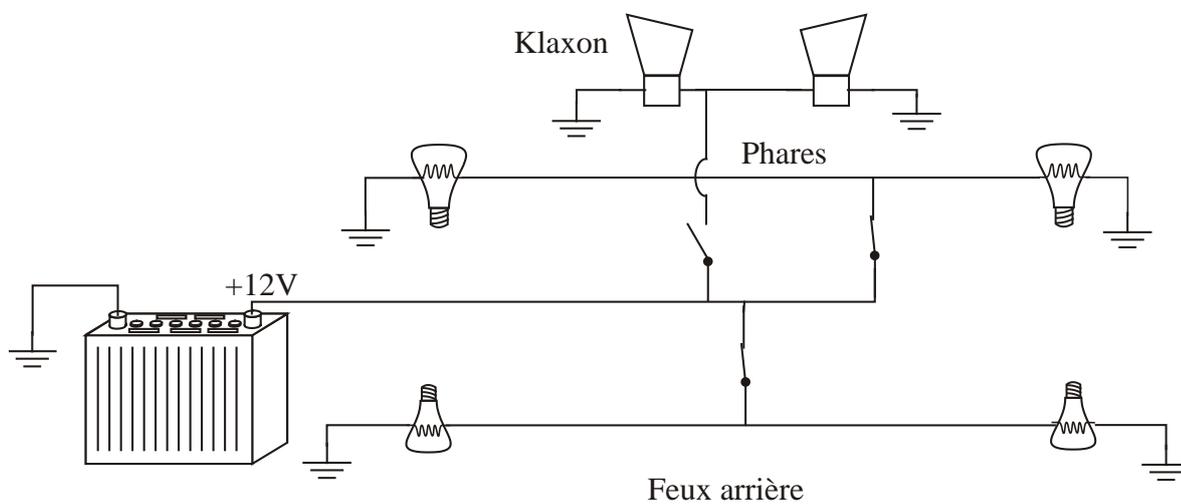
Dans le circuit suivant, on remplace R_2 par une résistance de 20Ω .

Cocher les cases des affirmations correctes.



Après le changement :

	Est plus petit	Reste le même	Est plus grand
I_1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I_2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I_3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



Indiquer dans ce schéma les appareils qui sont en fonctionnement et justifier votre réponse.

Vous devez expliquer ce que sont **le courant**, **la tension** et **la résistance** à votre petit(e) ami(e) que votre métier intrigue (pas technique pour un sou, ces mots ne font pas partie de son vocabulaire, et nul(le) en math.)

Rédigez en quelques lignes un texte explicatif pour qu'il/elle comprenne la nature de ces grandeurs et les interactions entre celles-ci.

J'ai fait remplir à mes élèves le questionnaire ci dessus qui pose des problèmes simples d'électronique (deux sources de tension et deux résistances au maximum). Ces problèmes sont tirés du document de Reinders Duit et Christoph von Rhöneck « Apprendre et comprendre les concepts clés de l'électronique. »

Population :

116 élèves de 9 classes ont répondu au questionnaire.

Ce sont des élèves électroniciens et automaticiens du CPNV à Yverdon, de la première à la troisième (dernière) année, et des élèves monteurs électriciens et télématiciens du CPMB de Collombier.

A noter que ce test a été passé au milieu du premier semestre environ, et que la classe de première année n'a eu une formation sur les éléments de base que depuis 2 mois.

Chacun de ces problèmes vérifie une ou plusieurs des conceptions fondamentales de l'électronique, soit :

Premier problème :

Vérifie la notion de conservation du courant le long d'une boucle fermée. Deux sources de tension et deux résistances avec des ampère-mètres répartis le long du circuit.

Deuxième problème :

Vérifie la notion de répartition uniforme de la tension aux bornes de composants en parallèle, mais vérifie surtout que les élèves ont acquis le fait qu'il ne faut pas considérer un circuit de manière séquentielle, un élément après l'autre (raisonnement local), mais que toute partie influe sur l'ensemble.

Troisième problème :

Vérifie la notion de différence de potentiel, une source, une lampe, on demande de quantifier la tension entre différents points du circuit.

Quatrième problème :

Dans la même veine que l'exercice deux, vérifie que l'élève ne considère pas une résistance comme agissant localement en retenant momentanément le courant mais qu'elle agit bien sur l'ensemble du circuit (Raisonnement systémique plutôt que séquentiel).

Une source, deux résistances, on augmente l'une des résistances puis l'autre (la première gardant sa nouvelle valeur) et on demande de préciser les variations de courant.

Cinquième problème :

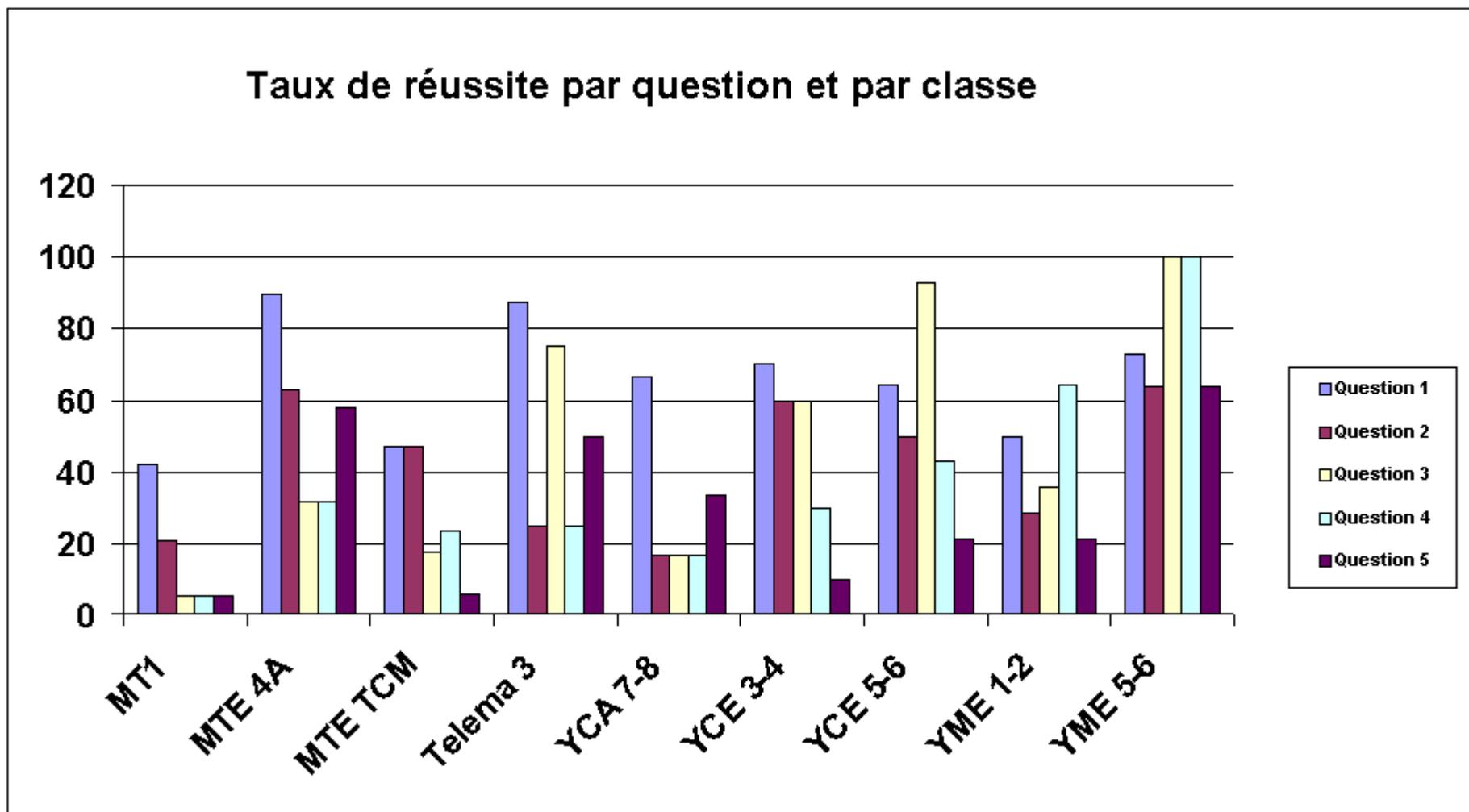
Le plus difficile. Une source de tension constante, deux résistances en parallèle, on augmente la valeur d'une des résistances et on demande de déterminer les variations des trois courants.

On vérifie là que les élèves ont une vision correcte des relations entre courant, résistance et tension et du comportement de la source comme source à tension constante et non courant constant.

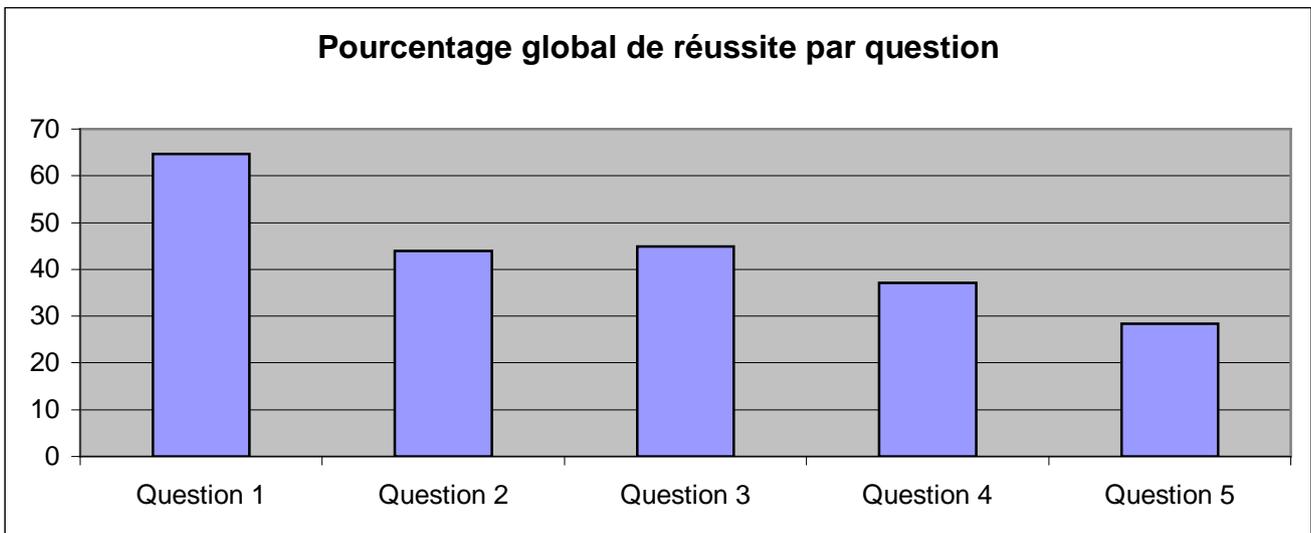
Sixième problème :

Une sixième question portant sur la vérification de la notion de masse a été résolue correctement par tous les élèves à qui elle a été soumise. Elle ne figure donc pas dans le tableau suivant.

Taux de réussite par question et par classe



Analyse des résultats électricité



Tout d'abord, il est à noter que pour des questions de base en électricité à des électriciens, on pourrait s'attendre à des résultats plus brillants. Il est à noter que seul 1-3 élèves par classe ont répondu correctement à toutes les questions. On voit sur le graphique ci-dessus que la question 5 est celle qui a posé le plus de difficultés.

A ce tableau un peu sombre, il faut cependant ajouter que les questions posées, bien que basiques demandent d'être tout à fait au clair avec ses notions de base, c'est là que le bât blesse et que l'on peut éventuellement trouver une explication à tant d'erreurs.

Question 1	Nombre
Juste	75
I2 est plus petit que I1	17
I2 est plus petit que I1 I3 plus grand que I1	5
I2, I3, I4 plus grand que I1	5
Rien répondu	4
I2, I3, I4 plus petits que I1	3
I3 est plus petit que I1	2
Réponses diverses	5

Question 2	Nombre
Juste	51
0.6 / 0.3 / 0.3 A	43
1.2 / 1.2 / 1.2 A	11
1.2 / 0.6 / 0.6 A	4
Rien répondu	3
Réponses diverses	7

Question 3	Nombre
Juste	52
6V, 6V, 6V	49
6V, 6V, 0V	4
6V, 0V, 6V	2
6V, 3V, 3V	2
Rien répondu	2
Réponses diverses	6

Question 4	Nombre
Juste	43
I1 et I2 restent constants dans les deux cas	10
1er rempl.: I2 =	10
1er rempl.: I2 = ; 2eme rempl.: I1 =	7
1er rempl.: I2 > ; 2eme rempl.: I1 et I2 =	4
2eme rempl.: I1, I2 =	3
1er rempl.: I1 >, I2 = ; 2eme rempl.: I1 =, I2 >	3
1er rempl.: I1 >, I2 = ; 2eme rempl.: I1, I2 >	3
1er rempl.: I1, I2 > ; 2eme rempl.: I1 et I2 sont >	3
1er rempl.: I1, I2 =	3
1er rempl.: I2 = ; 2eme rempl.: I1 et I2 =	3
1er rempl.: I1 > ; 2eme rempl.: I1 >	2
1er rempl.: I1 > ; 2eme rempl.: I1 =, I2 >	2
1er rempl.: I2 >	2
Rien répondu	2
Réponses diverses	16

Question 5	Nombre
Juste	33
I1 reste le même	20
I1 reste le même, I2 plus grand	20
I1 est plus grand, I3 est plus grand	7
I1 reste le même, I2 plus petit	5
I1 reste le même, I2 plus petit, I3 plus grand	5
I2 est plus grand	5
I2 est plus petit	5
I1 reste le même, I3 reste le même	3
I2 est plus petit, I3 reste le même	3
I1 est plus petit, I2 reste le même	2
Rien répondu	2
Réponses diverses	6

Analogies recueillies par le questionnaire

J'ai demandé aux élèves de m'indiquer de quelle manière ils expliqueraient les grandeurs électriques et les interactions entre ces grandeurs à leur copain/copine, novice en la matière.

Dans les réponses données par les élèves on relève les analogies suivantes :

Electrons :

Nombre d'occurrences : 25 + 10 combinées à d'autres.

Les phénomènes électriques sont décrits comme étant un déplacement de charges, on voit apparaître le modèle de Bohr de l'atome et des notions électrostatiques de surplus et manque de charges.

Tuyau :

Nombre d'occurrences : 8 + 18 combinées à d'autres.

Représentation d'un bout de tuyau avec rétrécissement qui permet de mettre en évidence I/U/R comme débit/pression/étranglement.

Réservoir / tuyau:

Nombre d'occurrences : 12 + 6 combinées à d'autres.

Le réservoir comme source de tension et un tuyau qui est considéré comme résistance soit en vertu de son diamètre, soit en fonction d'un rétrécissement/robinet qui apparaît sur le tuyau.

Rivière :

Nombre d'occurrences : 14 + 2 combinées à d'autres.

Une rivière avec une largeur qui permet de passer plus ou moins de courant ou des herbes et cailloux qui freinent le passage de l'eau

Barrage :

Nombre d'occurrences : 3 + 3 combinées à d'autres.

Illustration de la résistance dans certains cas en combinaison de la conception du courant comme rivière ou, comme source de pression avec un trou au bas du barrage où va apparaître le courant.

Circuit d'eau :

Nombre d'occurrences : 4

Représentation d'eau qui tourne dans un tuyau fermé avec des résistances (sable, rétrécissement, robinet) le long du circuit.

Autres / aucune:

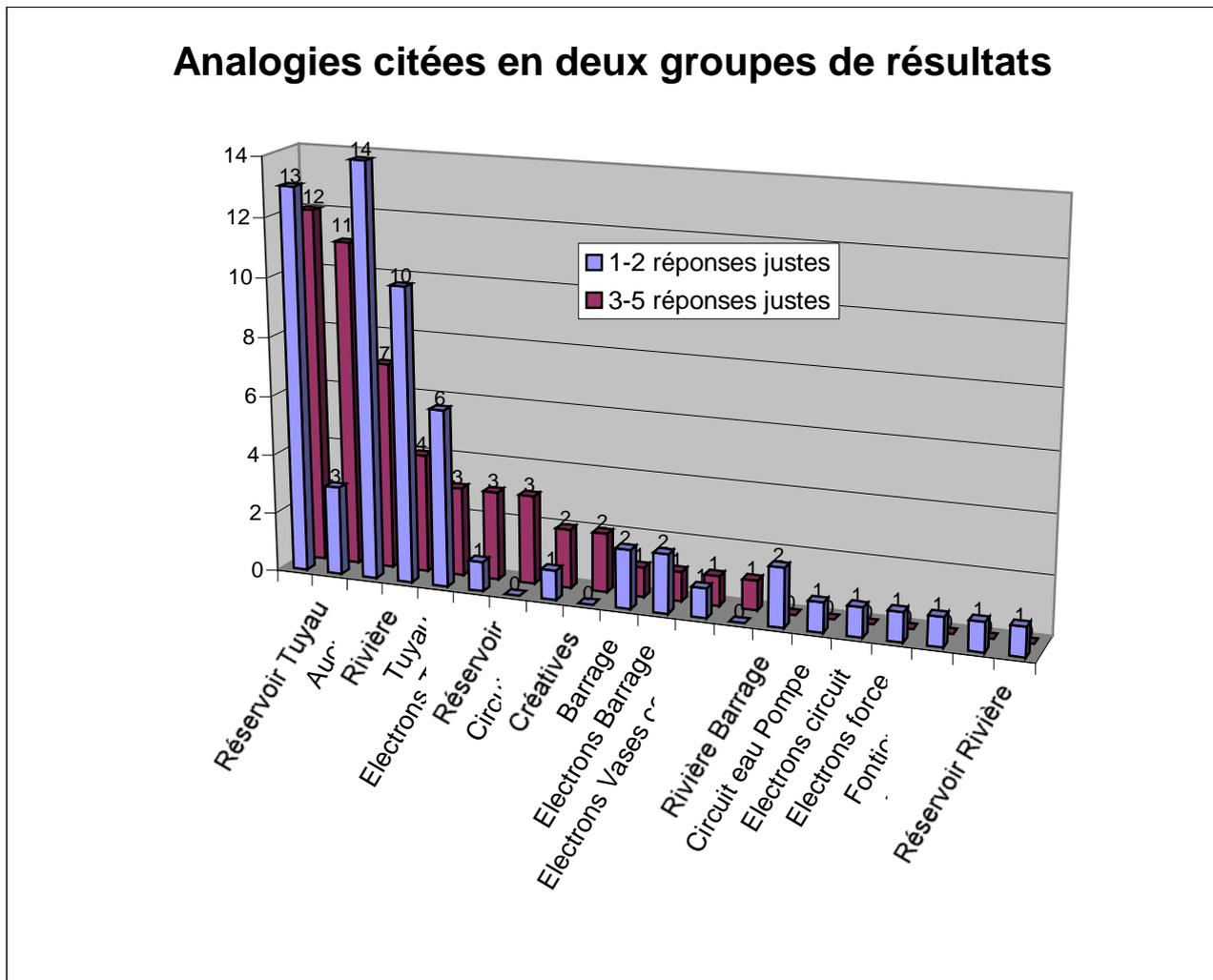
Nombre d'occurrences : 2 / 4

Description du courant comme une circulation de véhicules et le rétrécissement de la route comme résistance ou écoulement du jus d'une tomate avec U comme pression de la main sur la tomate et I comme volume de jus s'écoulant et R, résistance de la tomate à l'écrasement.

A titre d'anecdote, une autre analogie créative trouvée dans les réponses est l'amour. « Mon amour pour toi est le courant, ton amour pour moi est la tension, plus tu m'aime plus je t'aime. Tes collègues de boulot c'est la résistance, plus il y en a, plus tu m'en parles et moins je t'aime ».

21 élèves n'ont pas rempli cette rubrique.

Mise en évidence des analogies utilisées en fonction du résultat obtenu (critère d'efficacité)



A noter que le groupe bleu « 1 à 2 réponses justes » est composé de 60 élèves alors que le groupe rouge « 3 à 6 réponses justes » est composé de 51 élèves.

Ce graphique tente de lier de bonnes ou mauvaises réponses à certains types de représentations.

Les tendances sont très ténues en raison de la taille de l'échantillon recueilli mais on peut tout de même remarquer quelques tendances:

- Dans le groupe rouge, les analogies liées à un réservoir sont utilisées 14 fois contre 4 pour le groupe bleu.
- Les analogies de rivière sont utilisées 13 fois dans le groupe bleu contre 4 dans le groupe rouge.
- La notion de tuyau est évoquée à 14 fois dans le groupe rouge contre 9 fois dans le groupe bleu
- Les élèves capables d'analogies créatives sont dans le groupe rouge
- Ceux qui sont incapables de formuler une quelconque explication sont évidemment dans le groupe bleu.

Bien que ce ne soient que des conjectures basées sur trop peu de données, il ressort que les élèves ayant une explication du genre Réservoir ou Tuyau ont de meilleurs résultats que les élèves qui expliquent les phénomènes électriques par une analogie de type rivière ou qui n'ont pas d'explication du tout.

Annexe II : Dimensionnement de la turbine (inductance) :

$$Rn1 := 26$$

$$Rn2 := 24$$

$$d := 15$$

$$Lp := Rn2 - \frac{d}{2} \quad Lp \text{ flottante,4} \rightarrow 16.50$$

$$Lg := 2 \cdot (Rn1 - Rn2) \rightarrow 4$$

$$\text{Rapport } Lg/Lp: \frac{Lg}{Lp} \rightarrow \frac{8}{33} \text{ flottante,4} \rightarrow .2424$$

$$\text{Débit en litre /min: } Q := 3$$

$$\text{Vitesse en t/s: } f := 5$$

$$\text{Volume d'eau par tour en mm cube: } V := \frac{Q \cdot 10^6}{60 \cdot f} \quad V \text{ flottante,4} \rightarrow 1.000 \cdot 10^4$$

$$\text{Surface de la base du corps creux de la pompe: } S := \pi \cdot (Rn1^2 - Rn2^2)$$

$$\text{hauteur du corps de pompe en mm: } h := \frac{V}{S} \quad h \text{ flottante,4} \rightarrow 31.83$$

Pour calculer la surface utile d'une palette, il faut savoir de combien elle sort de l'axe.

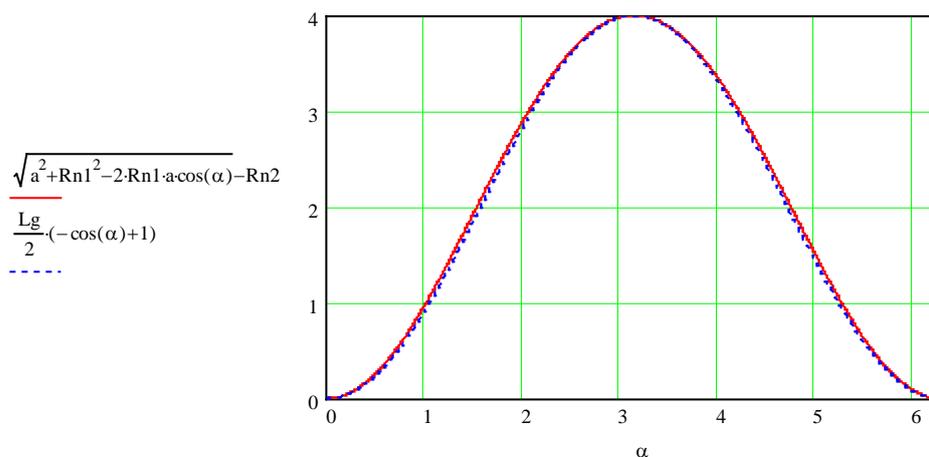
Cette fonction peut être calculée à partir du triangle a,b,Rn1

$$\text{Le théorème du cosinus nous dit que: } b^2 = a^2 + Rn1^2 - 2 \cdot a \cdot Rn1 \cdot \cos(\alpha)$$

$$\text{Si on donne: } a := Rn1 - Rn2 \quad b = \sqrt{a^2 + Rn1^2 - 2 \cdot Rn1 \cdot \cos(\alpha)}$$

on peut tracer la fonction qui détermine la largeur utile de la palette soit $Lgu = f(\alpha)$

$$Lgu := \sqrt{a^2 + Rn1^2 - 2 \cdot Rn1 \cdot a \cdot \cos(\alpha)} - Rn2$$

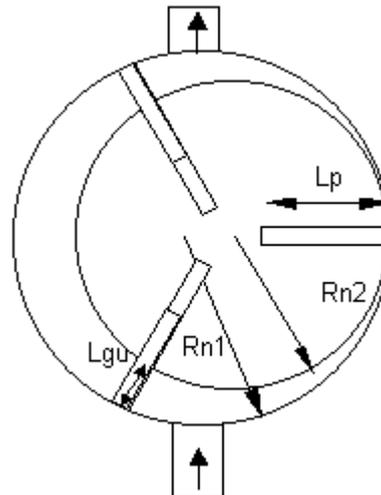


$$\text{On peut faire l'approximation suivante: } Lgu := \frac{Lg}{2} \cdot (-\cos(\alpha) + 1)$$

Si l'on veut connaître le couple créé par une palette sur l'axe, il faut tenir compte du couple antagoniste créé par la palette qui arrive ensuite.

La configuration telle que présentée (3 palettes) est nécessaire pour le fonctionnement correct de la turbine.

A partir de là, lors du passage d'une palette devant l'entrée de la turbine, la suivante est 30° avant l'horizontale (sens horaire). Ensuite l'axe tourne et cette palette va elle aussi passer devant l'entrée. Cette séquence part de $\alpha = -30$ à $\alpha = +90$ soit 120°.



Configuration $\alpha = 0$

Le calcul du couple provoqué par une palette doit tenir compte de la surface de la palette et de la distance moyenne à l'axe de rotation.

$$L_{gu} := \frac{L_g}{2} \cdot (-\cos(\alpha) + 1)$$

Couple moteur provoqué par la palette qui vient de passer devant l'entrée:

$$M_m := P \cdot L_{gu} \cdot h \cdot \left(R_{n2} + \frac{L_{gu}}{2} \right)$$

Pression en N/mm² $P := 0.2$ correspond à 2 bar

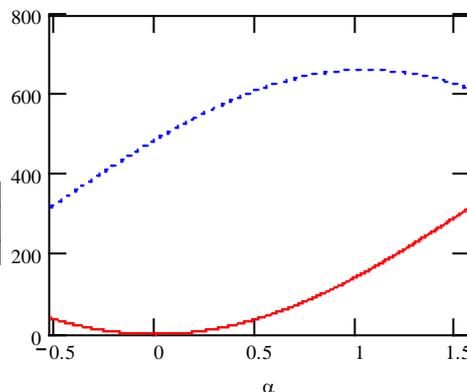
$$M_m := P \frac{L_g}{2} \cdot (-\cos(\alpha) + 1) \cdot h \cdot \left[R_{n2} + \frac{\frac{L_g}{2} \cdot (-\cos(\alpha) + 1)}{2} \right]$$

Le couple antagoniste de la palette suivante a un comportement décrit par la même équation mais avec un décalage de 120°.

$$M_m := P \frac{L_g}{2} \cdot \left(-\cos\left(\alpha + 2\frac{\pi}{3}\right) + 1 \right) \cdot h \cdot \left[R_{n2} + \frac{\frac{L_g}{2} \cdot \left(-\cos\left(\alpha + 2\frac{\pi}{3}\right) + 1 \right)}{2} \right]$$

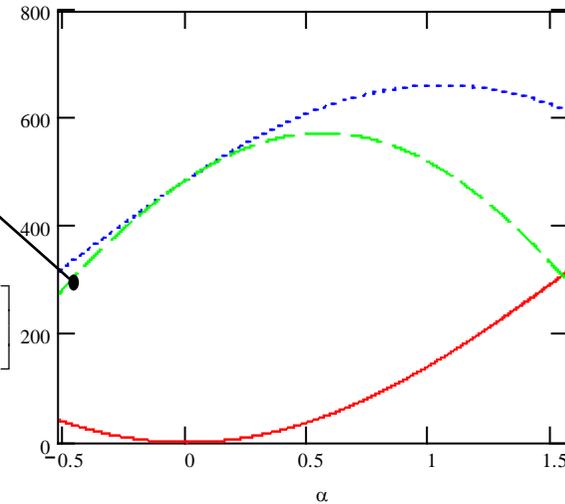
$$\frac{P \cdot L_g}{2} \cdot (-\cos(\alpha) + 1) \cdot h \cdot \left[R_{n2} + \frac{\frac{L_g}{2} \cdot (-\cos(\alpha) + 1)}{2} \right]$$

$$\frac{P \cdot L_g}{2} \cdot \left(-\cos\left(\alpha + 2\frac{\pi}{3}\right) + 1 \right) \cdot h \cdot \left[R_{n2} + \frac{\frac{L_g}{2} \cdot \left(-\cos\left(\alpha + 2\frac{\pi}{3}\right) + 1 \right)}{2} \right]$$



Le couple résultant est la différence des deux (traitillé vert).

$$\begin{aligned}
 & \underline{P \frac{Lg}{2} \cdot (-\cos(\alpha)+1) \cdot h \cdot \left[Rn2 + \frac{Lg}{2} \cdot \frac{(-\cos(\alpha)+1)}{2} \right]} \\
 & \text{---} \\
 & \text{---} P \frac{Lg}{2} \cdot \left(-\cos\left(\alpha + 2\frac{\pi}{3}\right) + 1 \right) \cdot h \cdot \left[Rn2 + \frac{Lg}{2} \cdot \frac{(-\cos\left(\alpha + 2\frac{\pi}{3}\right) + 1)}{2} \right] \\
 & \text{---} \\
 & \text{---} P \frac{Lg}{2} \cdot \left(-\cos\left(\alpha + 2\frac{\pi}{3}\right) + 1 \right) \cdot h \cdot \left[Rn2 + \frac{Lg}{2} \cdot \frac{(-\cos\left(\alpha + 2\frac{\pi}{3}\right) + 1)}{2} \right] - P \frac{Lg}{2} \cdot (-\cos(\alpha)+1) \cdot h \cdot \left[Rn2 + \frac{Lg}{2} \cdot \frac{(-\cos(\alpha)+1)}{2} \right] \\
 & \text{---}
 \end{aligned}$$



Couple moyen en N mm:

$$\frac{3}{2\pi} \left[\int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} P \frac{Lg}{2} \cdot \left(-\cos\left(\alpha + 2\frac{\pi}{3}\right) + 1 \right) \cdot h \cdot \left[Rn2 + \frac{Lg}{2} \cdot \frac{(-\cos\left(\alpha + 2\frac{\pi}{3}\right) + 1)}{2} \right] - P \frac{Lg}{2} \cdot (-\cos(\alpha) + 1) \cdot h \cdot \left[Rn2 + \frac{Lg}{2} \cdot \frac{(-\cos(\alpha) + 1)}{2} \right] d\alpha \right] \text{ flottante, } 3 \rightarrow 474.$$

Lexique :

Abaque :

Diagramme, graphique donnant par simple lecture la solution approchée d'un problème numérique. En l'occurrence, une courbe donnant la valeur de ζ (dzeta) pour un type de tuyau et des conditions d'écoulement déterminées.

Auditif, Visuel, Kinesthésique :

Canaux de perception préférentiels, certains auront plus de facilité à appréhender un concept s'il est présenté sous forme d'image (visuel), pour d'autres, il sera plus profitable de le leur présenter sous forme d'une histoire racontée (auditif), pour les kinesthésiques, c'est par le toucher ou une représentation faite avec leur corps qu'ils appréhenderont le mieux un phénomène nouveau.

Axiomatique (modèle):

Issu d'axiome : Vérité non démontrable qui s'impose avec évidence.

Cinétique (énergie):

Relatif au mouvement, énergie emmagasinée dans un corps en mouvement.

Cognitif :

Ayant rapport avec la connaissance et les processus de son acquisition.

Condensateur :

Élément électrique constitué de deux armatures séparées par un isolant et capable de stocker des charges électriques. Par opposition à l'inductance, le condensateur à un comportement macroscopique qui est de s'opposer, grâce à l'énergie emmagasinée, aux variations de tension.

Electrocinétique :

Partie de la physique qui étudie les charges électriques en mouvement indépendamment des champs magnétiques créés.

Herzienne (oscillations) :

Se dit des ondes électromagnétiques, ces ondes se propageant sans support (également dans le vide) et sont utilisées pour diverses transmissions (radio, télé, lumière, etc.)

Iconicité (échelle d') :

De A. Moles, échelle de 12 degrés définissant la complexité de représentation d'un objet ou d'un concept. Le premier degré est l'objet lui-même, le deuxième degré est une représentation tridimensionnelle à l'échelle de l'objet, ..., le septième degré est une représentation par un plan ou schéma (mètre, schéma électrique), ... en douzième et dernier degré se trouvent la description de type mathématique ou textuel de l'objet.

Inductance, self :

Issus de self-induction (coefficient de), rapport entre le flux d'induction magnétique produit par l'élément et le courant qui le parcourt.

Élément électrique capable de stocker de l'énergie magnétique proportionnellement au courant qui le traverse et qui la restitue lors de la diminution du courant. Le comportement macroscopique d'une inductance est de s'opposer à toute variation du courant qui la traverse. Plus la valeur de cette inductance sera élevée (grandeur :L, unité : Henri [H]), plus elle aura de moyens pour empêcher les variations du courant.

Isomorphe :

De même forme.

Langagière :

Ayant trait au langage.

Miscible :

Qui a la propriété de former avec un autre corps, un mélange homogène. Deux liquides non miscibles sont, par exemple, l'huile et l'eau.

PNL :

Programmation Neuro Linguistique. Discipline qui prétend résoudre des problèmes de souffrances psychiques (de comportement, de phobies) par « l'ancrage » (la liaison) d'un état de bien-être à un geste/une parole/une pensée (une ancre) sensée rétablir instantanément l'état de bien être lorsque l'on fait appel à cette « ancre ».

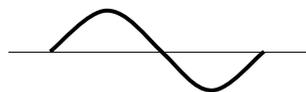
Cette discipline est connue pour avoir été utilisée avec succès dans certains problèmes (p.ex phobies) mais elle est aussi connue pour peiner à résoudre les problèmes de fond (rechute) et a une odeur de soufre car sujette à des dérives de type sectaire.

Sémantique :

Etude scientifique de la signification des unités linguistiques (des mots).

Sinusoidal :

En forme de sinusoïde, graphique de la fonction sinus.



Vecteur :

Représentation d'un phénomène à l'aide d'une flèche. Un vecteur à une longueur, une direction (angle) et un sens. Très utilisé pour la représentation des forces en mécanique. Exemple :



Bibliographie :

Giordan A. « Les conceptions des apprenants » in La pédagogie : une encyclopédie pour aujourd'hui Ed. Paris ESF 1993

Guy Robardet / Jean-Claude Guillaud « Eléments de didactique des sciences physiques »
Ed. Presses universitaires de France 1997 230p.

Samuel Joshua / Jean-Jacques Dupin « Représentations et modélisations »
Ed. Peter Lang 1989 220p.

Marie-Louise Zimmermann-Asta « Des questionnements pédagogiques comment faire ? »
Ed. du CEFRA Genève 2002 180p.

Samuel Joshua / Jean-Jacques Dupin « Introduction à la didactique des sciences »
Ed. PUF 1993 400p.

André Giordan, Françoise Guichard, Jack Guichard « Des idées pour apprendre »
Ed. Delagrave 2001 340p.

Jean-Pierre Astolfi, Eliane Darot, Yvette Ginsburger-Vogel, Jacques Toussaint « Pratiques de formation en didactique des sciences »
Ed. De boeck université 1997 490p.

Michel Caillot « Learning Electricity and Electronics with Advanced Educational Technology »
Ed. Springer Verlag 1993 329 p.

Reinders Duit et Christoph von Rhöneck « Apprendre et comprendre les concepts clés de l'électronique. » 11p.

En Anglais : <http://www.physics.ohio-state.edu/~jossem/ICPE/TOC.html>

En Français : <http://sir.univ-lyon2.fr/gric-coast/ICPE/francais/TOC.html>

Benoît Gauthier « Cours de didactique, Analogies » in cours de didactique des sciences DID 19601
Université Laval 1994 7p.

<http://www.pistes.fse.ulaval.ca/frames.php/outils/analogies/index2.html>

Denis Auquebon « traité d'électricité pour radio amateur » sur le site du groupe radio amateur Français « F6CRP » 2001 411p.

<http://perso.wanadoo.fr/f6crp/elec/cc/ui.htm>

Jean DELIRE « Physique - circuit électrique - analogies » sur le Serveur de ressources pour l'enseignement secondaire non confessionnel en Communauté française de Belgique 1993 6p.

<http://www.agers.cfwb.be/pedag/ressources/D049/anaelec.htm>

Marc Cosgrove « A study of science-in-the-making as students generate an analogy for electricity » University of Technology, Sydney 1995 20p.

<http://www.education.uts.edu.au/lrsg/research/cos951.htm>

Henri Poincaré « La théorie de Maxwell et des oscillations herziennes » Paris 1899 77p.

Disponible à la Bibliothèque nationale de France notice N°FRBNF37310819 ou chez Ebooks library <http://ebookslib.com/index.html?a=s&book=2295>

Christian Lachapelle « CyberScol-Projets éducatifs » 4p.

<http://mendeleviev.cyberscol.qc.ca/carrefour/theorie/planche.html>

Paul Brna David Ducan Université de Leeds UK

« The Analogical Model-based Physics System: A Workbench to Investigate Issues in How to Support Learning by Analogy in Physics » 15p.

<http://cbl.leeds.ac.uk/~paul/papers/caliscepaper96/CALISCE96paper.html>

Gieck formulaire technique 9^{ème} édition 1990