

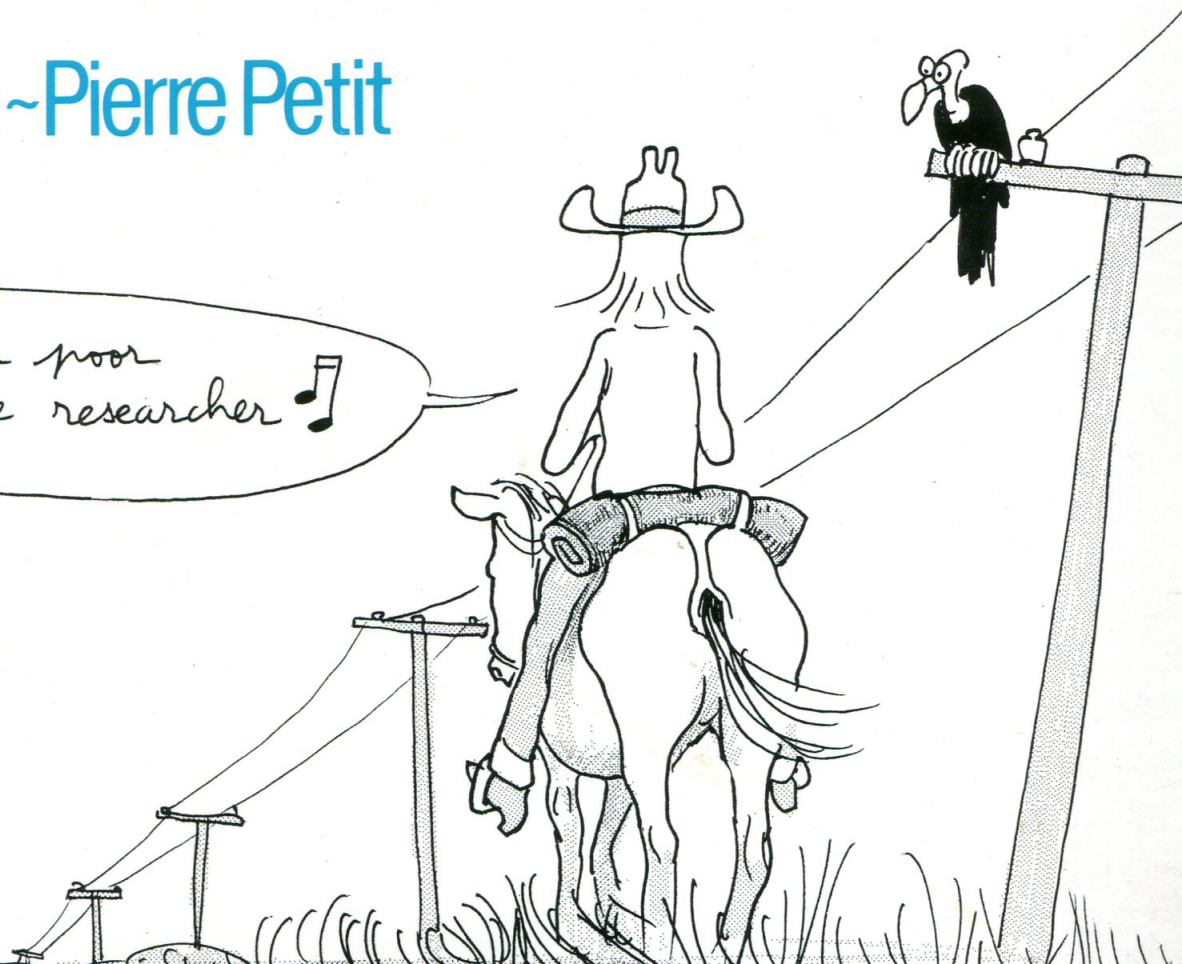
Les aventures  
**d'ANSELME  
LANTURLU**



POUR QUELQUES  
**AMPÈRES**  
DE PLUS

par Jean~Pierre Petit

*I am a poor  
lonesome researcher* 🎵



# Les Aventures d'Anselme Lanturlu

## Et Pour

## Quelques Ampères

## de Plus

Jean-Pierre Petit



# PROLOGUE

Il pleut, pas moyen de sortir de la maison.

Papier, ciseaux, ficelle.... fariboles! Que peut-on faire avec tout cela? Rien..

Qu'est-ce que vous racontez? il fait un temps superbe!

Eh oui, il faudrait de réels moyens de laboratoire pour faire des choses intéressantes. Un cyclotron... un laser?

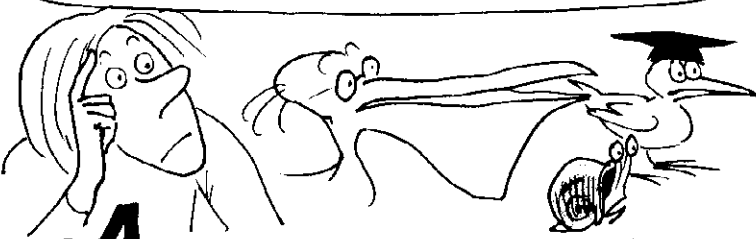
De quoi vous plaignez-vous? Vous avez tout sous la main!

Tu ne vas pas me faire croire que dans cette maison se trouve de quoi illustrer de grands problèmes scientifiques!

Rutherford<sup>(\*)</sup> disait qu'il aurait pu faire de la recherche au pôle Nord.

mais, ici, qu'est-ce qu'on peut faire?

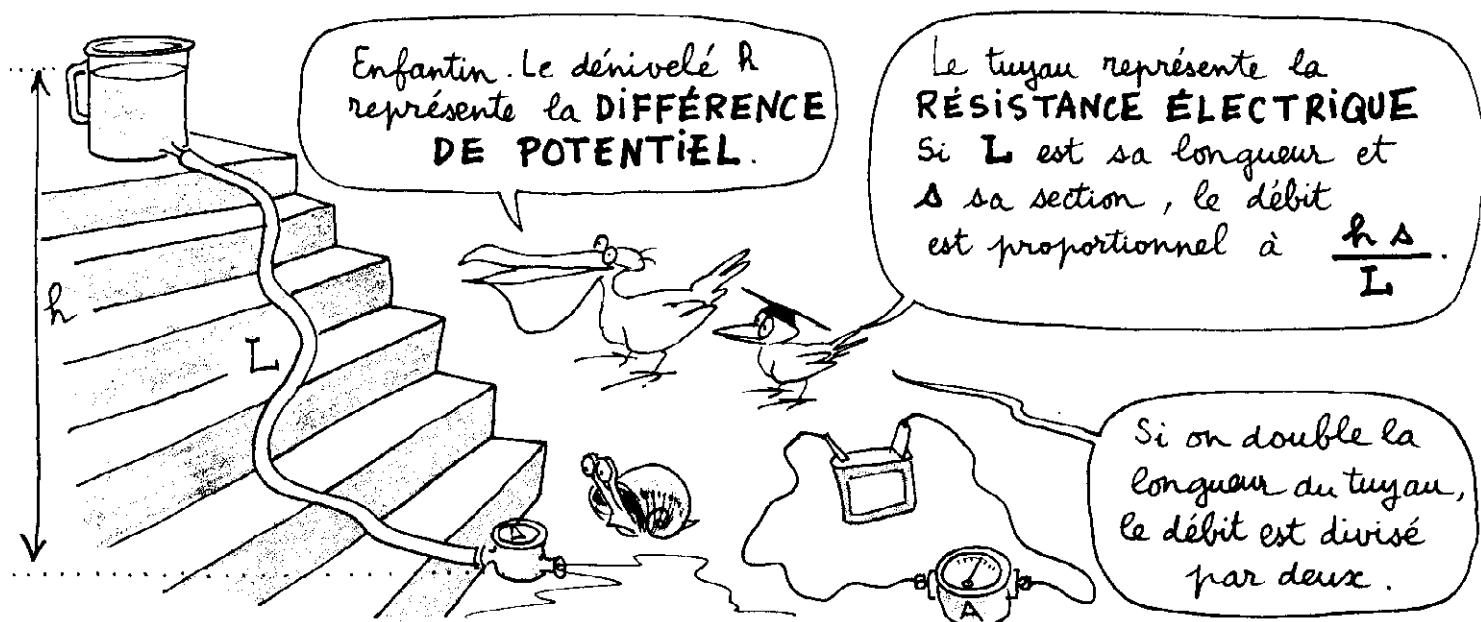
Vous m'amusez, tous. Pas un parmi vous ne serait capable de m'expliquer correctement comment fonctionne une lampe à incandescence.



(\*) Physicien néo-zélandais; découvrit l'atome en 1905.



# INTENSITÉ

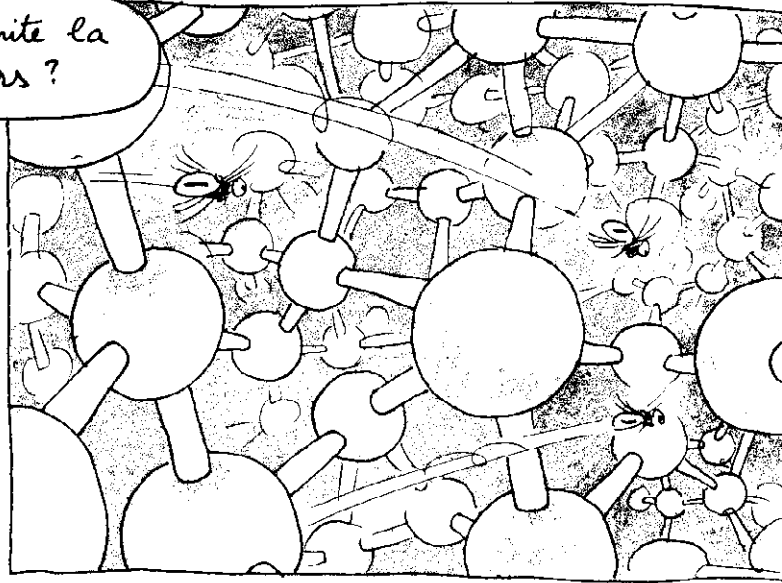


# RÉSISTANCE

Sophie, quel type de frottements limite la vitesse des électrons dans les conducteurs ?



Un fil de cuivre n'est pas un tube creux.

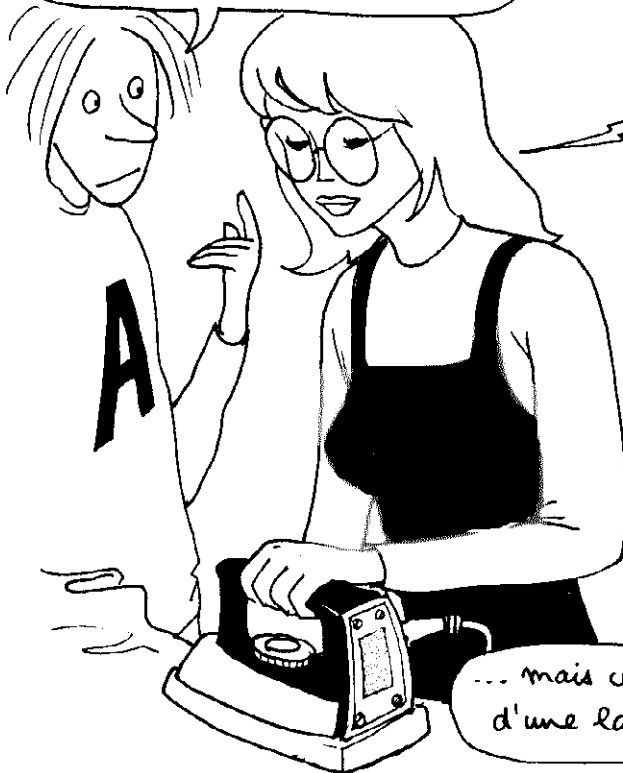


Les atomes sont fixes dans un métal et forment une sorte de réseau. Il existe, à toute température, des électrons libres qui peuvent se déplacer dans ce réseau. Ce sont les collisions avec les atomes qui vont gêner la progression, donc créer cet effet de **RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE**.

Mais pourquoi est-ce que le métal chauffe ?



Ces collisions ébranlent la structure atomique, et ces ébranlements se propagent de proche en proche, en constituant un effet de **CONDUCTION THERMIQUE**.



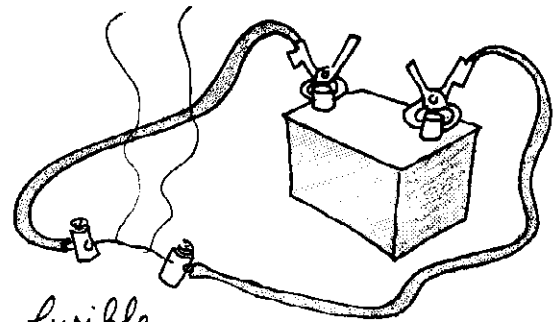
Ah oui, c'est ce qu'on appelle **L'EFFET JOULE...**

tout s'éclaire



... mais cela n'explique pas pourquoi le filament d'une lampe émet de la lumière...

Ces ébranlements peuvent même disloquer le réseau métallique. Il y a alors fusion.



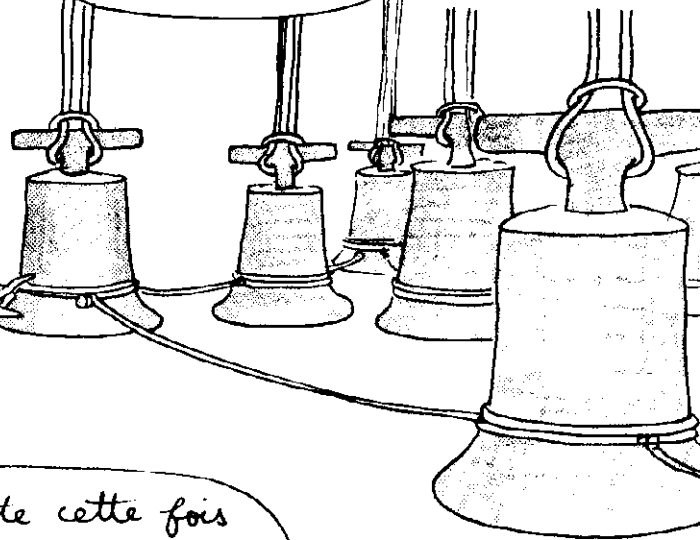
fusible



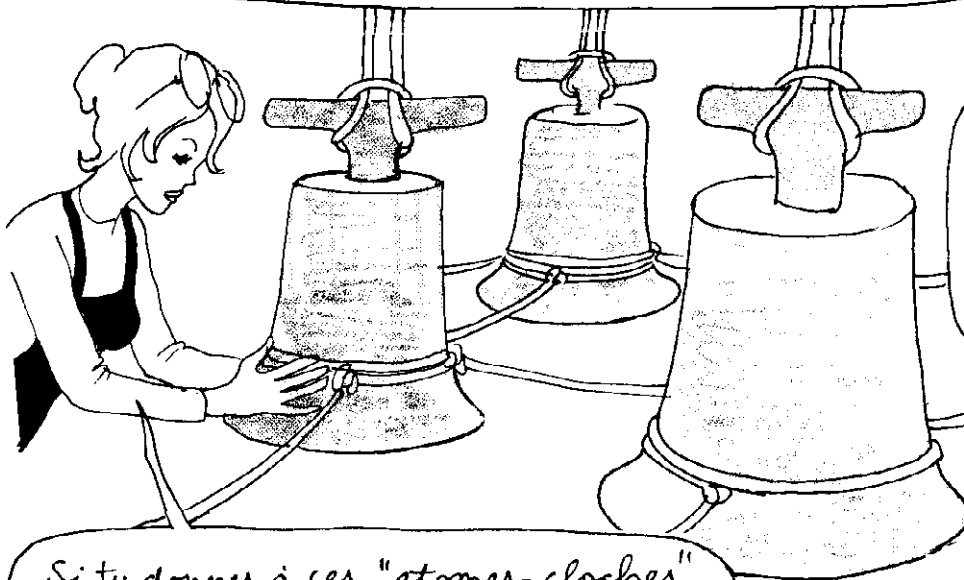
Et la lumière, d'où vient-elle ?



Eh, ça crâme !



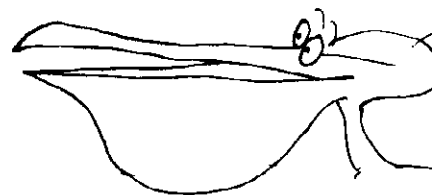
Imagine qu'on représente cette fois les atomes comme des cloches reliées les unes aux autres par des liens élastiques...



Cela constitue une bonne image du phénomène de conduction thermique dans un solide.



Si tu donnes à ces "atomes-cloches" des suites d'impulsions assez molles, celles-ci se propageront de proche en proche à toute la structure, par l'intermédiaire des liens élastiques.

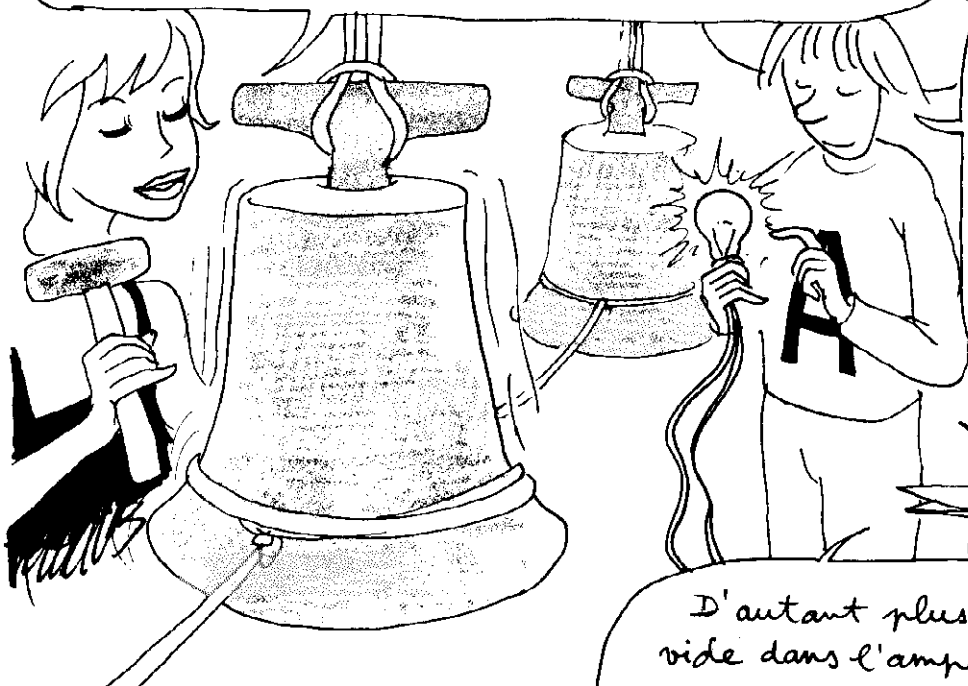




# L'INCANDESCENCE

Mais si l'impulsion est plus sèche, ou si un grand nombre d'impulsions s'accumulent, alors la cloche évacuera efficacement cette, **ÉNERGIE** en émettant des ondes sonores.

Compris : de la même façon, les atomes du filament émettent de l'énergie lumineuse à partir d'une certaine température, pour évacuer une énergie excédentaire que le phénomène de conduction ne parvient plus à dissiper.



D'autant plus qu'on a fait le vide dans l'ampoule pour réduire au minimum les pertes de chaleur par conduction thermique.

L'émission d'énergie par rayonnement sera d'autant plus intense que la température du solide sera élevée. On utilise donc pour les filaments des substances comme le tungstène, qui résistent à des températures de  $3000^{\circ}$  sans fondre.

Il est clair que les solides chauffés émettent du rayonnement. Mais pourquoi ce fer est-il **ROUGE** ?



Parce qu'il est à une température plus basse que le filament de la lampe. Le fer à repasser aussi émet du rayonnement...

Mets ta tête dans cette casserole chromée. Tu verras qu'elle réfléchit le rayonnement<sup>(\*)</sup> émis par ta peau.

Ah oui, je le sens très bien

toi aussi, tu émet du rayonnement.

est-ce que moi aussi j'émet du rayonnement?

Vous savez, mon cher Tirséas, en tant qu'animal à sang froid, vous ne devez pas émettre beaucoup.

En fait, le seul moment où les atomes d'un solide cessent de vibrer et d'émettre du rayonnement est celui où celui-ci est à la température du **ZÉRO ABSOLU**, qui est un état d'énergie minimale.

(\*) Ce type de rayonnement non visible, émis par des corps se trouvant à des températures moyennes ou basses, est appelé rayonnement **INFRAROUGE**.



Bon, maintenant que nous savons tout sur la lampe à incandescence, je crois que nous avons fini de dévoiler les mystères de cette modeste maison.



Anselme, le tube au néon de la cuisine vient de griller. Peux-tu le remplacer ?

# LE TUBE AU NÉON

Oh, zut !



Ça alors ! ?



Il n'y a pas de filament dans le tube...



Pas besoin !

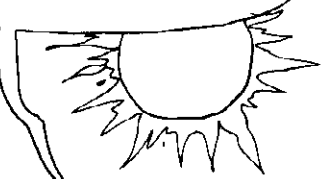


Ce sont les atomes de néon, qui emplissent le tube, qui évacuent sous forme de rayonnement l'énergie communiquée par l'impact des électrons qui y cheminent.

Bien sûr. Le gaz, le feu, le Soleil, comment crois-tu que cela marche ?



Les atomes d'un gaz peuvent émettre de la lumière ?



Oui, bien sûr.



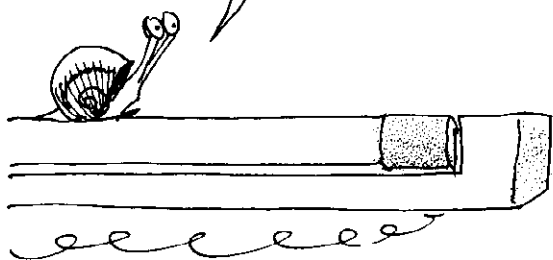
Dans un gaz chaud, ce sont les collisions entre les molécules, liées à l'**AGITATION THERMIQUE**, qui engendrent une émission de lumière



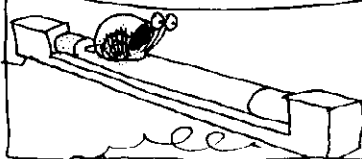
Bon. Ça ne doit pas être bien compliqué. On met la tension. Le courant passe. Le gaz chauffe et émet de la lumière.



Il n'y a qu'un ennui, Anselme... le gaz, quand le tube fonctionne, il reste froid



Tu as raison. Il y a quelque chose qui m'échappe...

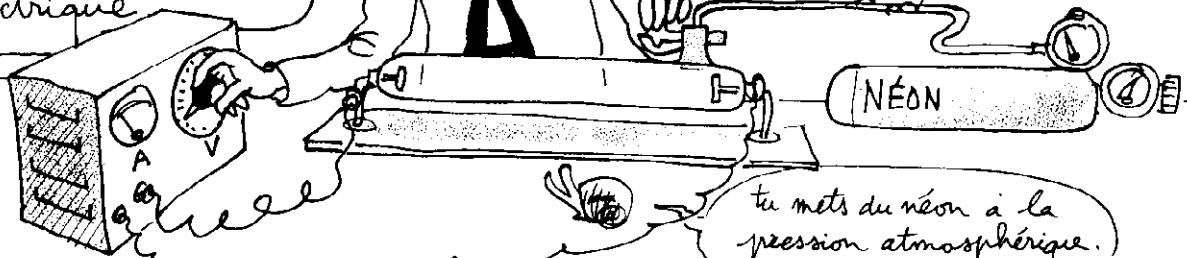


# LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE

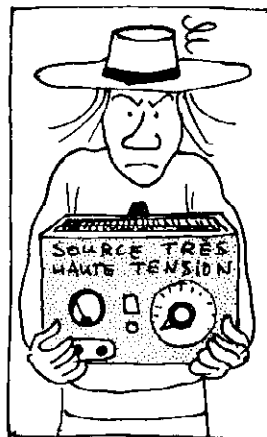
Dans ces cas-là, le guide le plus sûr, c'est l'expérience. Mettons du néon dans un tube. Aux deux bouts, j'ai disposé deux électrodes réunies à un générateur électrique



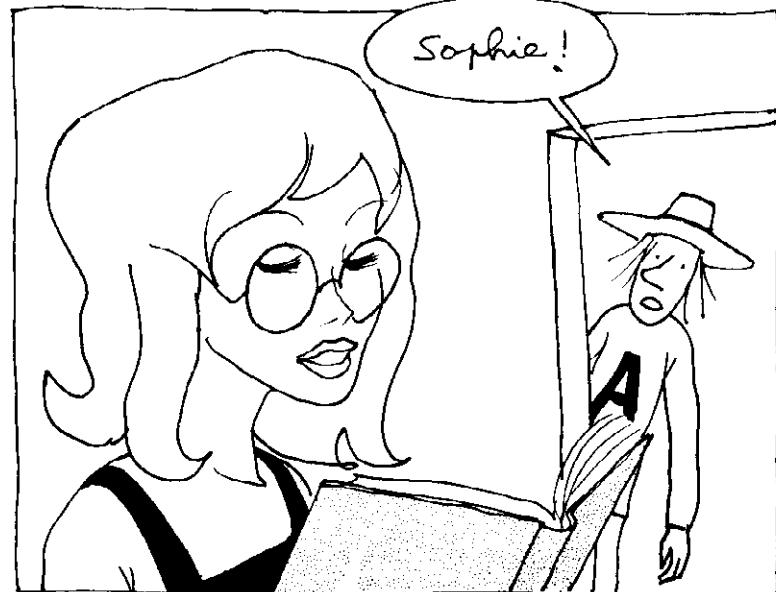
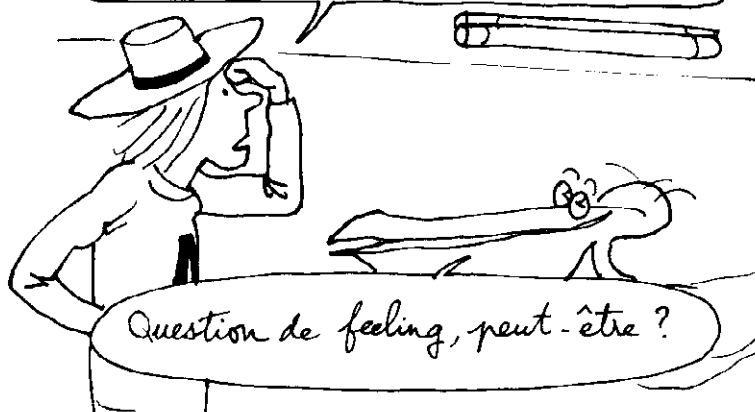
J'adore les expériences



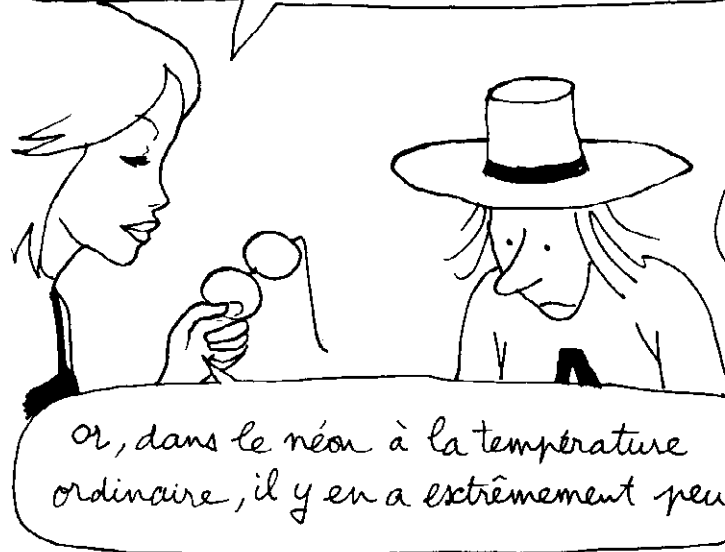
tu mets du néon à la pression atmosphérique.



Pourtant, dans le tube au néon  
de la cuisine, il passe un ampère  
sous deux cent vingt volts !?



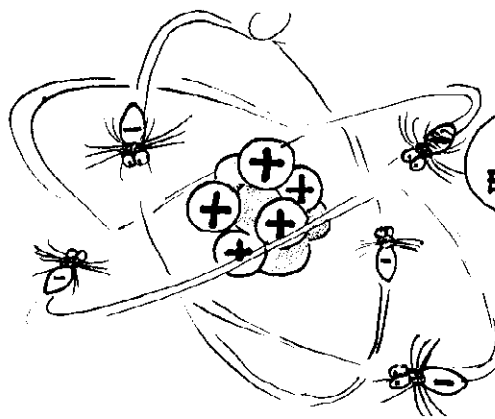
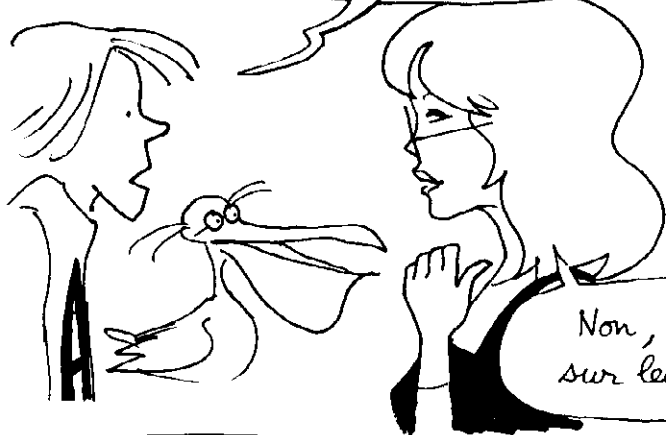
Dans un **CONDUCTEUR**, le passage  
du courant électrique s'effectue par  
un mouvement d'**ÉLECTRONS LIBRES**.



Et pourquoi le courant  
passe-t-il dans un métal ?



Tu veux dire qu'il n'y a pas d'électrons dans les gaz froids ?



Voilà donc des ÉLECTRONS LIÉS.

Non, mais ils sont tous occupés à tourner sur leur orbite, autour des noyaux des atomes.

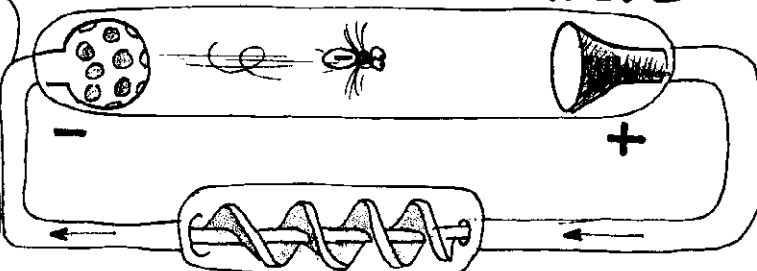
Qu'est-ce qui fait circuler les électrons ?

Ils sont mis en mouvement dans le **GÉNÉRATEUR**, qui agit comme une pompe.



CATHODE

ANODE



**GÉNÉRATEUR ÉLECTRIQUE**

Bon, alors où est le problème ?

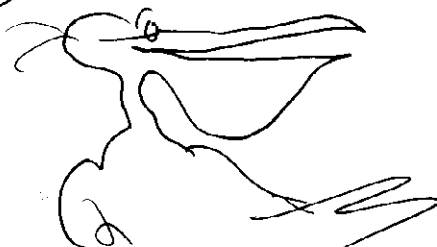
Formidable, il marche

Tirésias ôte-toi de là !

Mi !

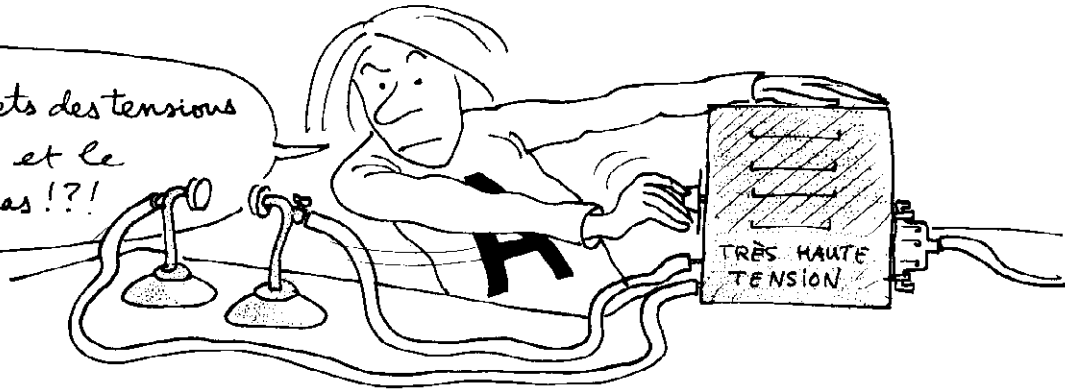
Anselme a trouvé sa POMPE À ÉLECTRONS.

C'est un générateur de courant continu en haute tension.

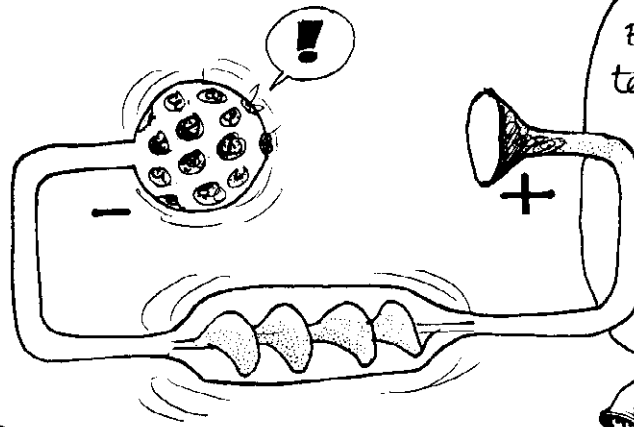


# L'ARC ÉLECTRIQUE

c'est curieux. Je mets des tensions de plus en plus élevées et le courant ne passe pas !?!

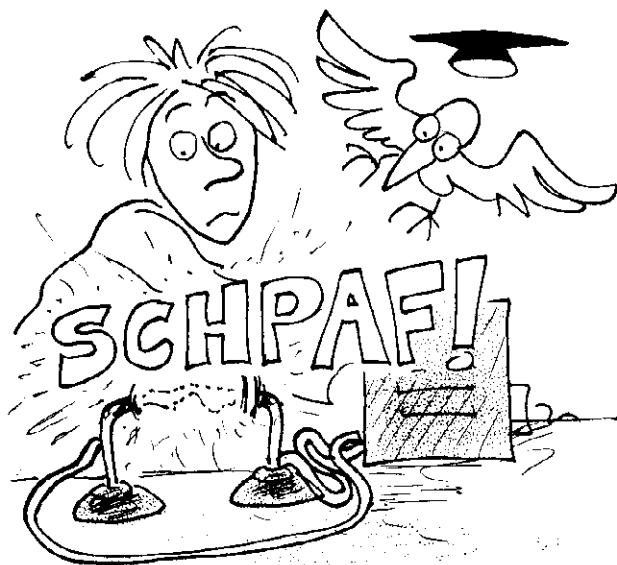
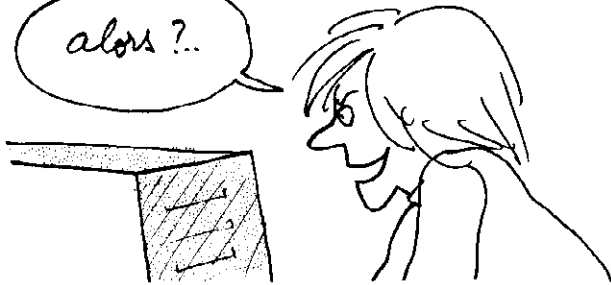


Vingt mille volts...  
trente mille...



En poussant la tension du générateur, Anselme accroît la "pression électronique" dans la cathode.

alors ?..

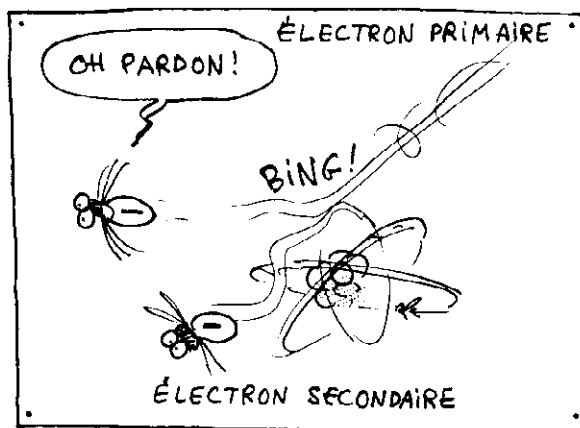
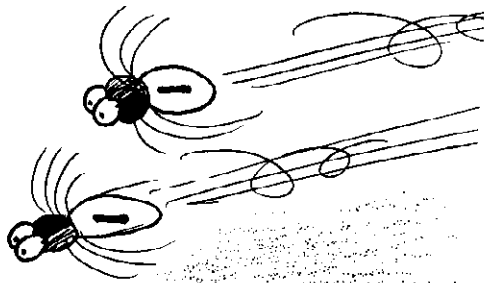


on peut savoir ce qui s'est passé ?



# L'AVALANCHE ÉLECTRONIQUE

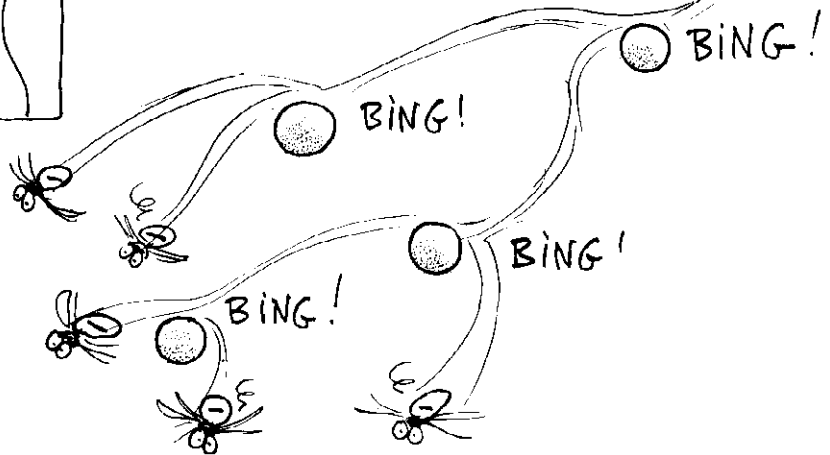
Un générateur électrique crée entre ses électrodes un **CHAMP ÉLECTROMOTEUR** qui tend à mouvoir les électrons libres. Même dans les gaz à la température ordinaire, il en existe un petit nombre qui vont être violemment tirés, de la cathode vers l'anode. Accélérant entre deux collisions avec les atomes, ces électrons, dits primaires, vont acquérir assez d'énergie (cinétique) pour pouvoir arracher des électrons liés à ces atomes, et les transformer en nouveaux électrons libres.



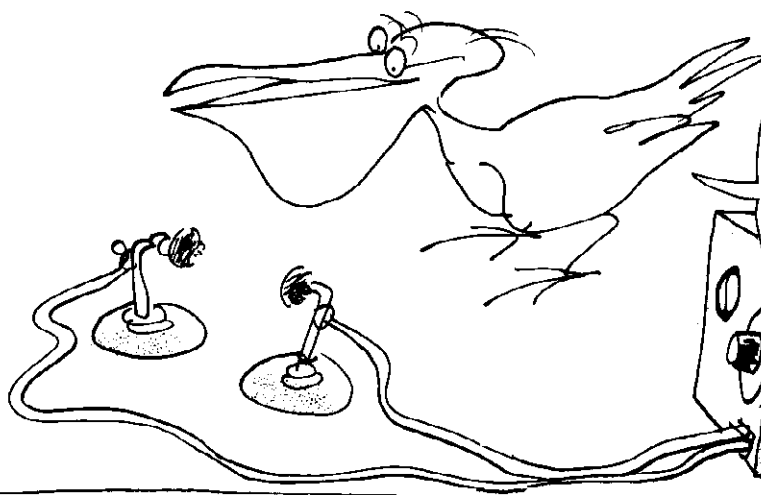
Chaque électron arraché devient un **ÉLECTRON LIBRE**, qui se met aussitôt à accélérer également.

Chaque électron initial, primaire, pourra ainsi donner naissance à un très grand nombre de nouveaux électrons secondaires.

On appelle ceci l'**AVALANCHE ÉLECTRONIQUE**.



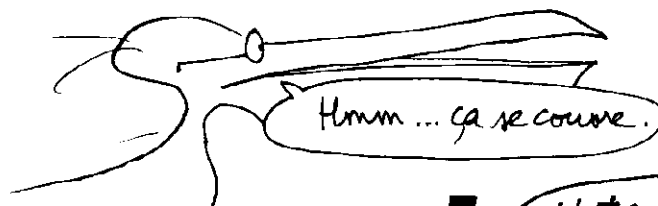




Dans l'expérience de tout à l'heure, ceci s'est traduit par une montée en flèche de l'intensité, du flux d'électrons

Autrement dit, le gaz situé entre les électrodes est devenu soudain très conducteur. Le générateur, placé en situation de **COURT-CIRCUIT**, a cramé.

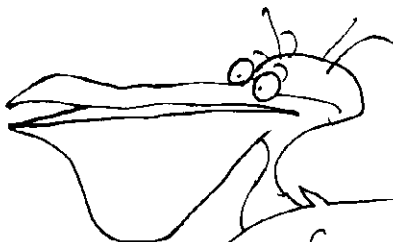
Dans l'air, le **CLAUQUAGE** se produit, à la pression atmosphérique, quand la différence de potentiel atteint 30.000 volts par centimètre.



Hmm... ça se couche.

# BOUM!

L'**ÉCLAIR** est un arc électrique qui se produit quand la différence de potentiel entre un nuage et le sol dépasse le seuil de claquage.



Comment l'électricité peut-elle faire un tel bruit?

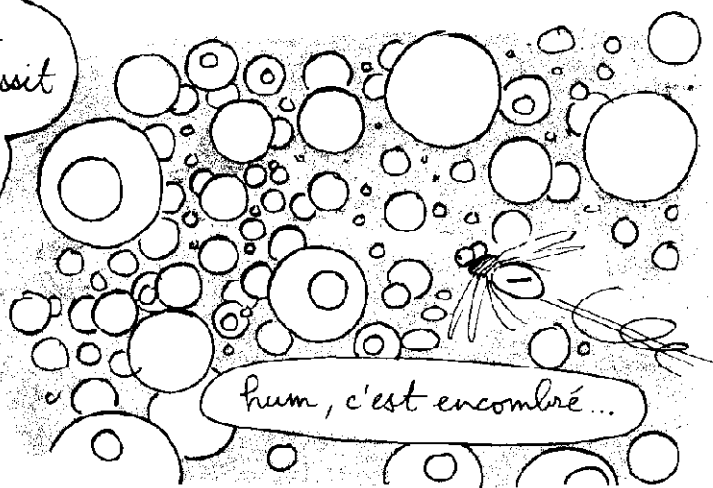
Dans l'arc électrique, il y a un violent dégagement de chaleur qui donne naissance à une **ONDE DE CHOC**.

Tout cela ne résout pas mon problème, ni n'explique pourquoi le courant passe dans le tube de la cuisine.

le mystère reste entier !

# LIBRE PARCOURS MOYEN

Voyons. L'avalanche électronique se produit quand l'électron réussit à acquérir assez d'énergie en fonction de l'espace, sur sa trajectoire...



hum, c'est encombré...

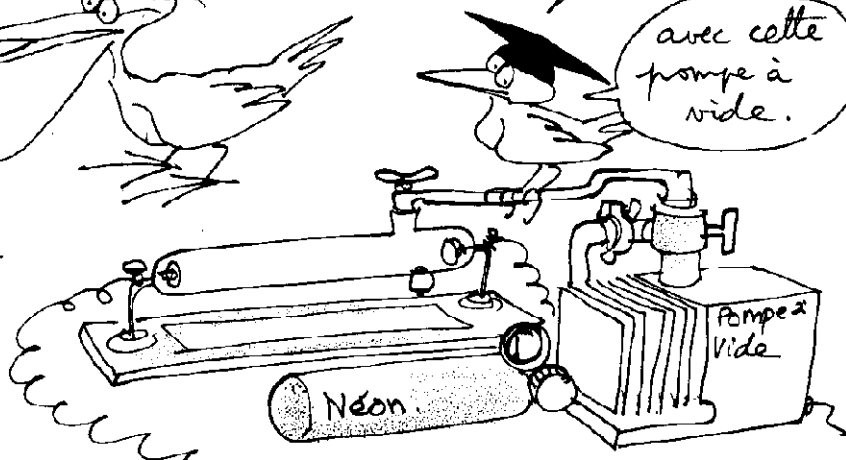
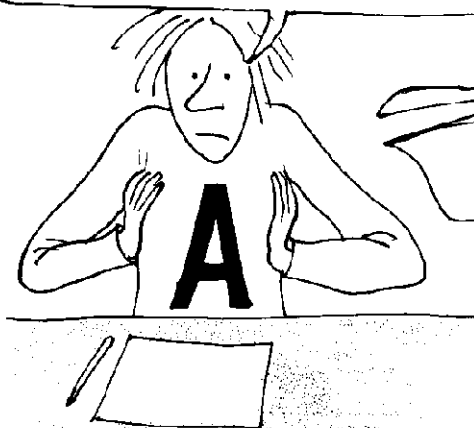
Qu'on appelle le **LIBRE PARCOURS MOYEN**

Il me semble que si j'accrois ce libre parcours moyen de l'électron, celui-ci accélérera plus longtemps, donc il acquerra plus d'énergie.

Mais... comment accroître ce libre parcours ?

Simple, tu dimines la densité du gaz !

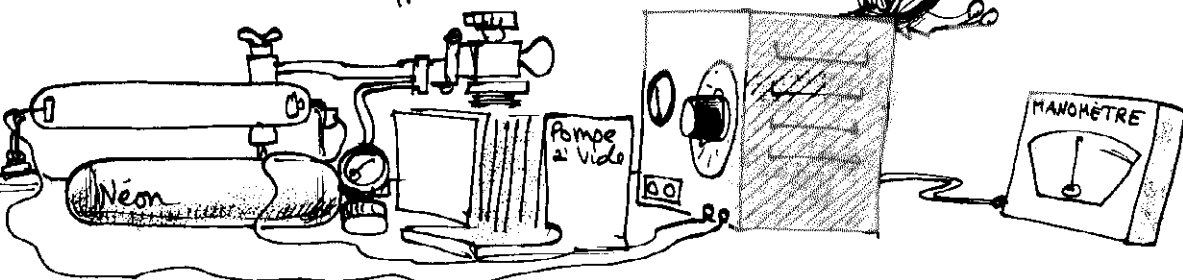
avec cette pompe à vide.



Je mets deux cents volts  
et je pompe.

PATAFLOUP  
PATAFLOUP  
PATAFLOUP

la pression descend.

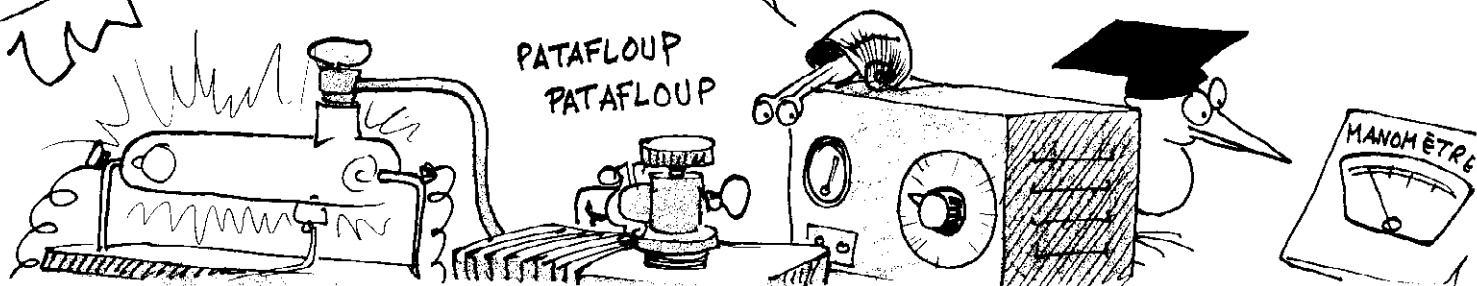


YOUPI!

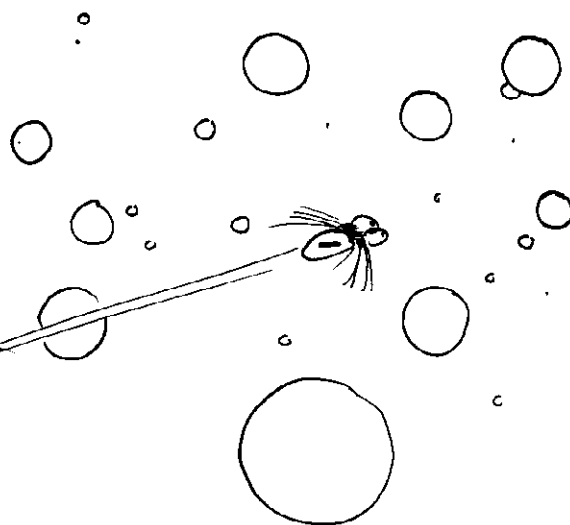
Sophie, le tube s'allume !

Le courant passe !

la pression est tombée  
à un dix millièème  
d'atmosphère.



Avec une pression aussi basse et une  
densité aussi faible, une tension de  
deux cents volts, appliquée sur ce tube  
de cinquante centimètres, suffit à  
créer l'avalanche électronique



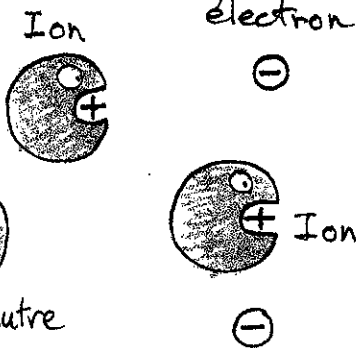
# IONISATION DÉSIONISATION

Dans cette... avalanche, dont vous parlez, il y a création en continu d'électrons libres. Mais... si la décharge se prolonge, à la fin, il n'y a plus que des électrons libres, non ?

Tu vois, Léon, tout électron qui quitte un atome laisse une charge positive orpheline, l'atome ainsi chargé étant appelé **ION**.

tous les atomes finissent par s'ioniser ?

mais... les charges de signes contraires s'attirent, non ?



Tout juste. les électrons tendent donc sans cesse à retourner sur les ions, en les neutralisant. c'est le phénomène de **DÉSIONISATION**.

Alors que la création simultanée d'électrons libres et d'ions est le phénomène d'**IONISATION**.

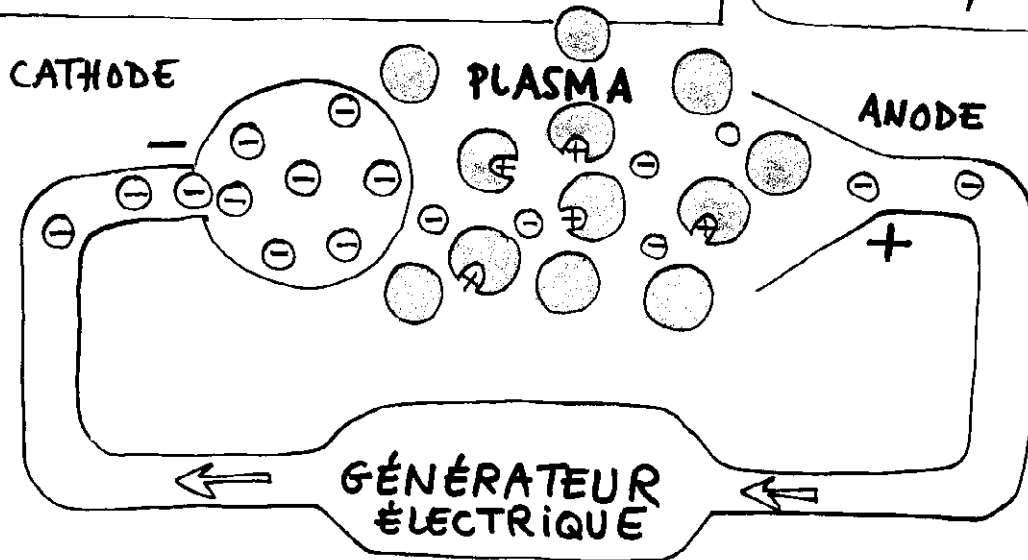
Dans la désionisation, l'excès éventuel d'énergie cinétique est dissipé sous forme de rayonnement, qui contribue à l'émission de lumière du gaz.

# LE PLASMA

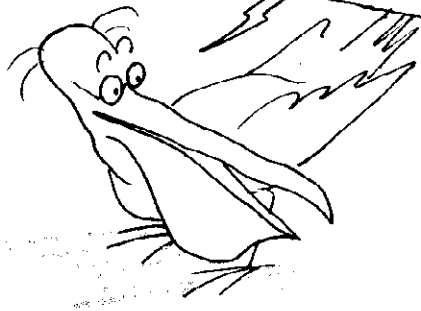
Résumons. Une espèce de pompe à électrons, appelée **générateur électrique**, enrichit une **CATHODE** en électrons. Cette charge cathodique agit sur les électrons du gaz en les accélérant et en créant sans cesse de nouveaux électrons libres par effet d'avalanche électronique. Lorsque les phénomènes d'**IONISATION** et de **DÉIONISATION** s'équilibrent, on obtient un mélange d'ions, d'électrons et d'atomes neutres qu'on appelle **PLASMA**, électriquement neutre.



Le courant d'électrons circule. Ils sont émis par la cathode et collectés par l'anode.



Sacrebleu. Ainsi, quand j'allume un tube au néon, je crée un **PLASMA** !



C'est fou ce qu'il y a dans une maison !



Un plasma !?



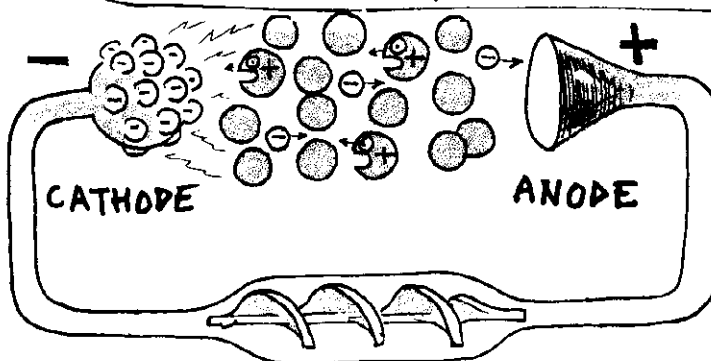
Un tube au néon en fonctionnement contient un plasma. Max dit que le soleil est aussi un plasma, une grosse boule de gaz ionisé. Mais pourquoi celui-ci est-il chaud, alors que le tube au néon reste froid ?

Dans ce type de plasma "froid", ce sont les chocs des électrons sur les atomes qui entretiennent l'ionisation, alors que dans le soleil ce sont les collisions entre atomes. Ceux-ci sont alors nécessairement très agités, ce qui veut dire que ce gaz est chaud.

Dans le tube au néon, on a une **IONISATION NON-THERMIQUE**.

Mais dans ce plasma, il y a deux sortes de charges : les électrons et les ions. En principe, la force électrique agit sur les deux, non ?

Exact. le champ électrique qui règne dans le tube et qui met les charges en mouvement tire les électrons dans



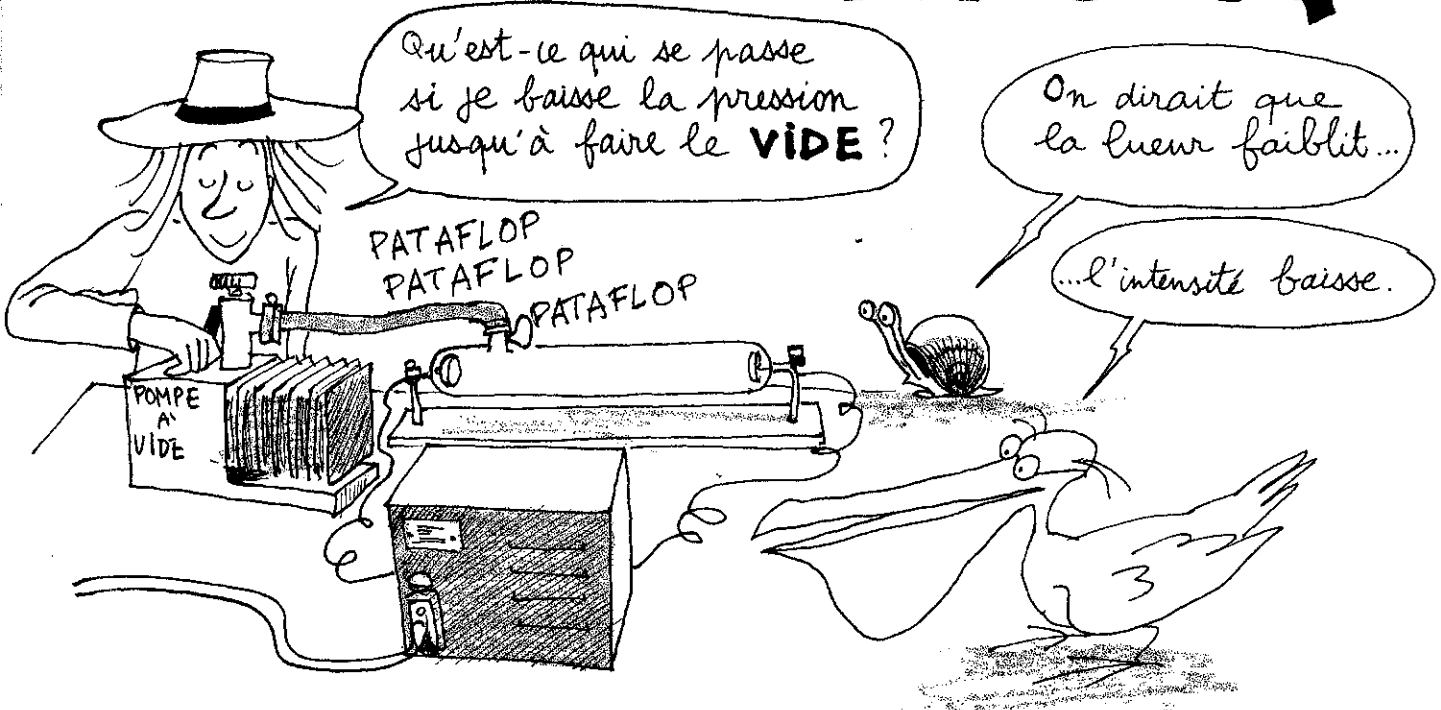
un sens et les ions dans l'autre.

le champ est dû à l'accumulation des électrons dans la cathode, due à la "pression" électronique.

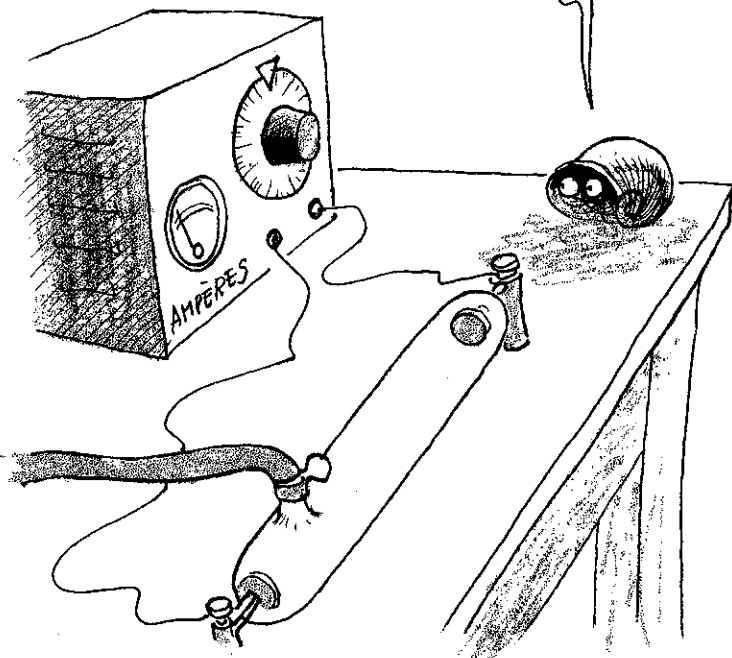
les collisions avec les atomes neutres freinent la progression des charges. Seuls les électrons, légers et mobiles, arrivent à se frayer un chemin dans cette cohue.

Ce qui veut dire que dans le tube au néon, le **COURANT IONIQUE** reste négligeable devant le **COURANT ÉLECTRONIQUE**.

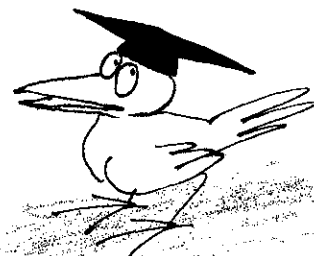
# ÉMISSION CATHODIQUE

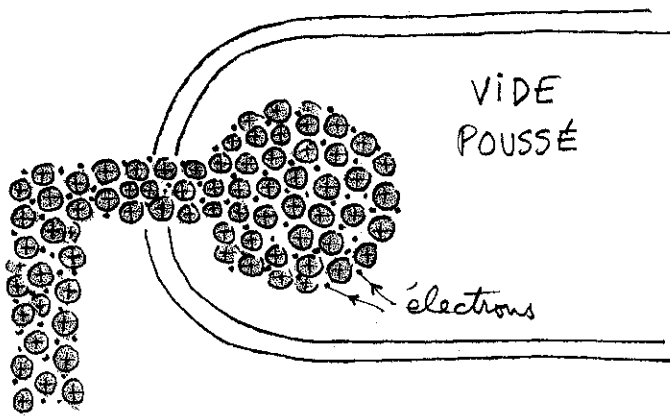


Je ne comprends pas. A haute pression, rien ne marchait. Puis, à pression inférieure ça s'est mis à marcher. Mais maintenant, quand on continue de baisser cette pression le courant dégingole. On dirait que la cathode a de plus en plus de mal à cracher ses électrons.

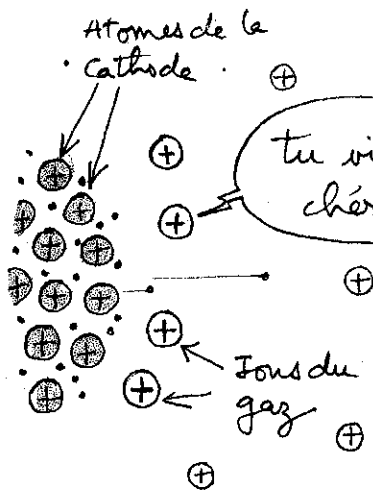
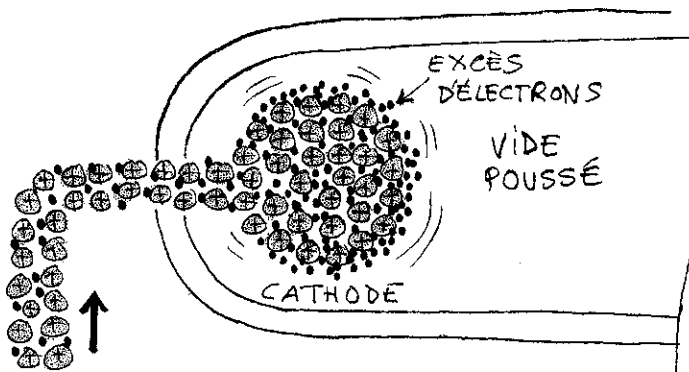


pourquoi ?





La cathode est un morceau de métal constitué de noyaux d'atomes, chargés positivement, et d'électrons.



tu viens, chéri?

Mais si le gaz est trop dense, le courant ne passera pas non plus. Ce qui fait qu'il existe une pression optimale (\*).

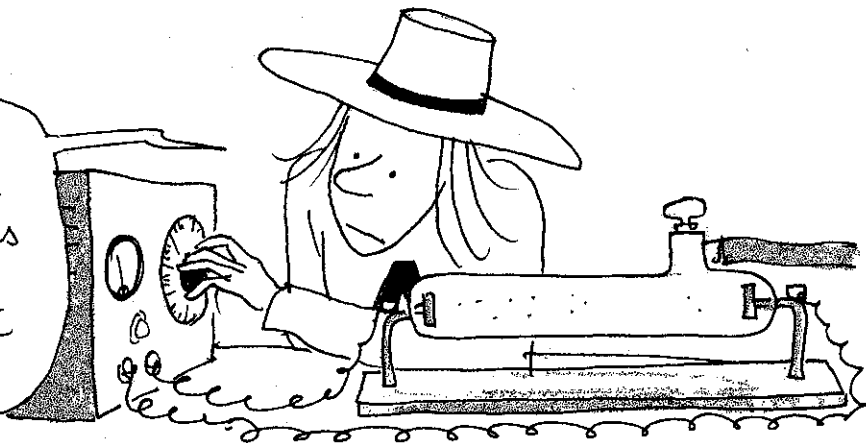
Un générateur électrique a pour effet d'accumuler les électrons libres du métal dans la cathode. Mais si la tension reste insuffisante, cette pression électronique reste trop faible pour permettre aux électrons de s'arracher aux atomes du métal.

Par contre, s'il existe des atomes de gaz à l'état d'ions, ceux-ci faciliteront cette évacuation électronique.

(\*) le minimum de Paschen.

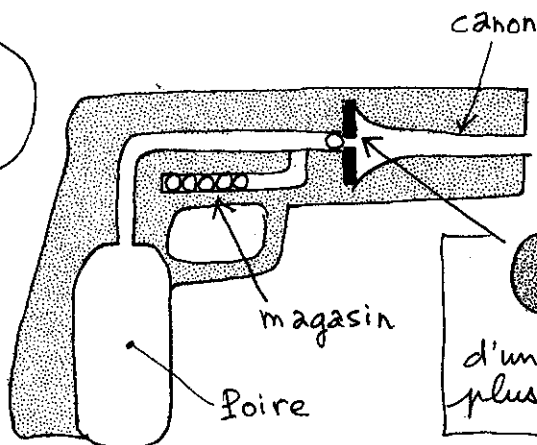


Quand dans le tube règne un vide poussé, il faut appliquer une tension de plusieurs milliers de volts pour faire émettre les électrons au compte-goutte par la cathode.



Cette tension ne dépend que du métal dont est fait cette cathode.

Ceci est un vieux pistolet PNEUMATIR



membrane en caoutchouc percée d'un trou légèrement plus petit que le plomb.

Lorsqu'on presse sur la poire, la membrane se déforme et le plomb est éjecté avec force

PTI OUP

PTI OUP

comme quand on crache un noyau de cerise.

Attention devant!

FTI OUP!

Quand une cathode émet, elle se comporte comme une sorte de passoire percée d'une multitude de petits trous à travers lesquels les électrons sont éjectés violemment par une "pression électronique".

# L'EFFET DES POINTES



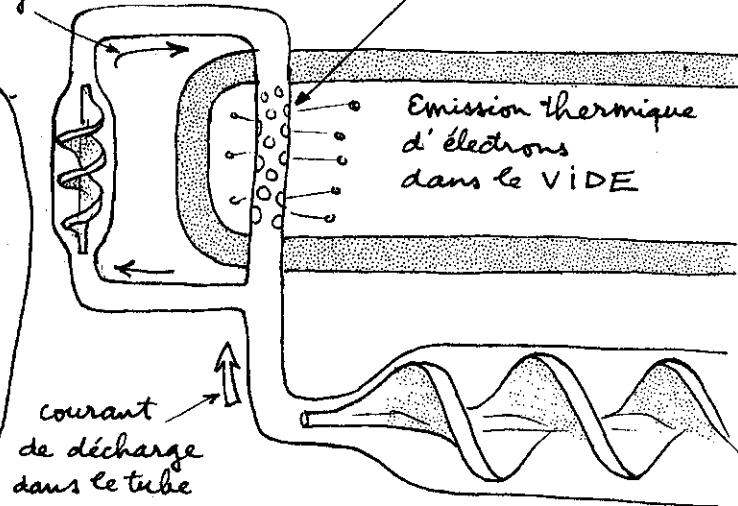
Revenons aux décharges dans les tubes à vide :



cathode chauffée

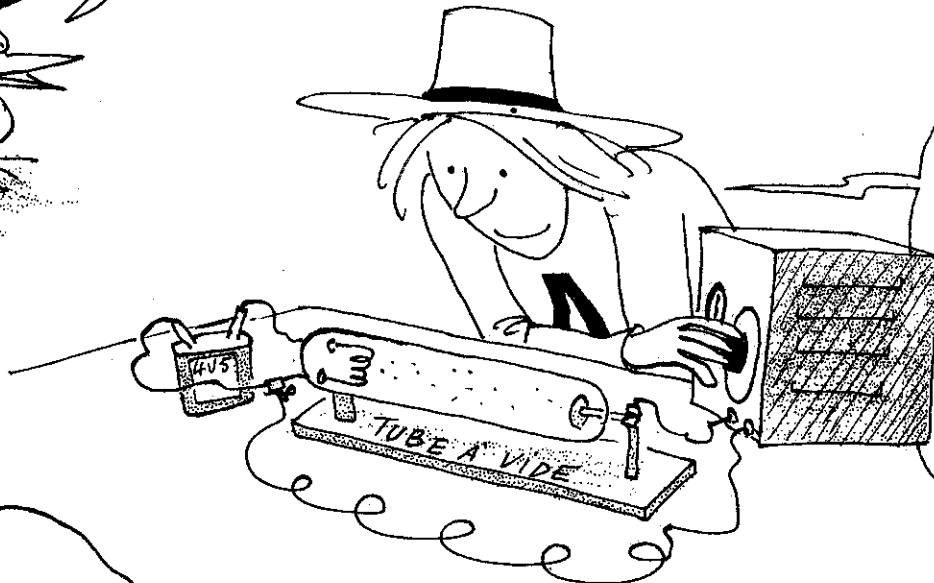
courant de chauffage de la cathode

On peut grandement faciliter cette émission électronique en chauffant la cathode, par exemple en y faisant circuler une petite boucle de courant, comme ceci, avec un second générateur en basse tension (une simple pile peut suffire).



Emission thermique d'électrons dans le VIDE

courant de décharge dans le tube



"Pompe" principale haute tension

ouh là là ! c'est drôlement efficace. J'arrive à faire passer du courant dans le tube avec moins de cent volts.

Sophie, tout ce qu'on est en train de faire, c'est quoi ?

tout ce jeu avec les électrons...

Ça s'appelle e' ÉLECTRONIQUE !

L'électronique  
ça sert à quoi ?

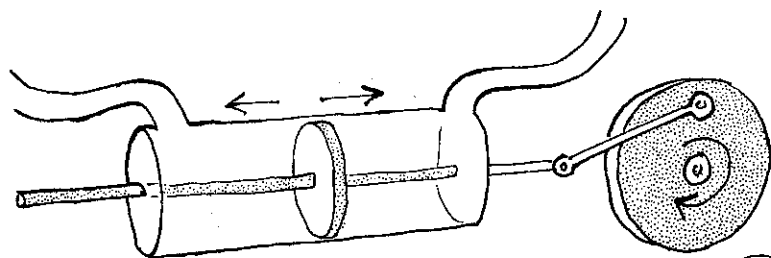
ma foi...

Eh, les copains,  
attendez ...

Depuis le début, on représente les  
générateurs électriques comme des  
sortes de pompes. Mais dans la  
maison, ce qu'on reçoit, sauf  
erreur, c'est de l'alternatif...

Alors, mes  
amours, vous  
pensiez que tout  
dans une maison  
était évident ?

# COURANT ALTERNATIF



Voilà un autre type de  
générateur électrique - pompe,  
qui fonctionne de manière  
alternative

Drôle de "pompe" en vérité, qui  
aspire et refoule alternativement ! ?

comprends plus...

mais alors, où met-on l'anode et où met-on la cathode ?

Les électrodes jouent les deux rôles en alternance.

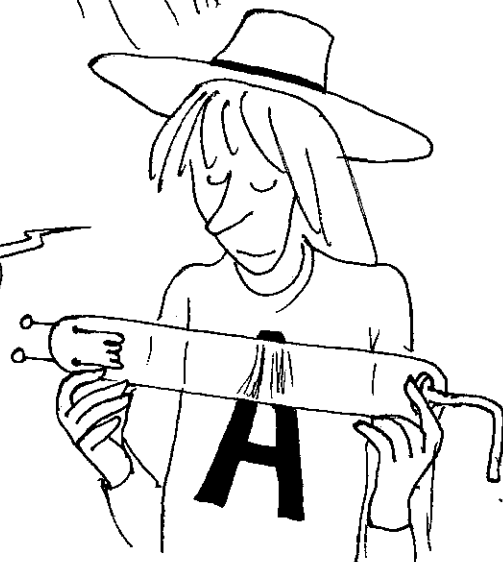
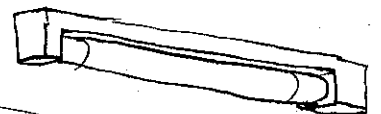
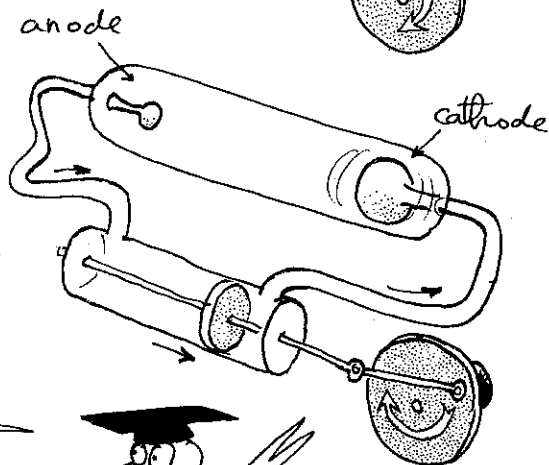
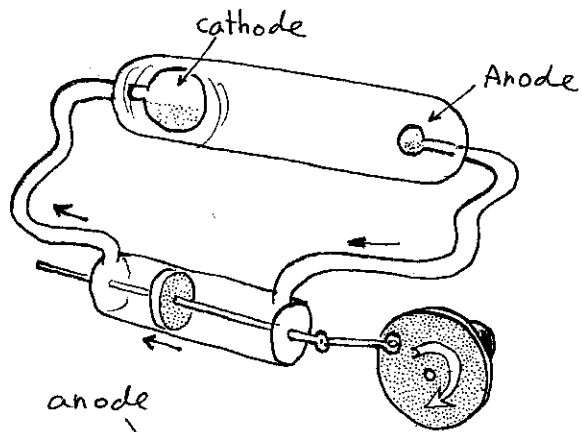
Mais alors, tout ce qui a été dit précédemment peut s'adapter ?

L'avalanche électronique, l'ionisation non thermique et tout le bazar...

Hum, c'est logique, sinon je ne vois pas comment le tube au néon de la cuisine pourrait fonctionner avec du 220V alternatif.

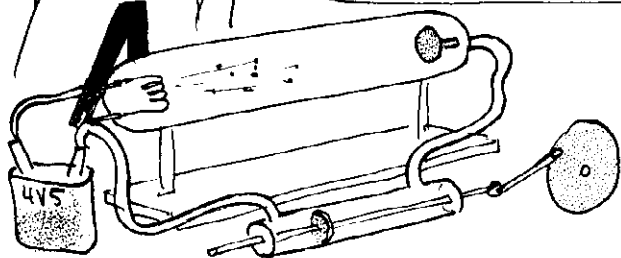
# LA DIODE

Mais, que se passe-t-il si j'envoie du courant alternatif sur le montage de tout à l'heure, avec une électrode chaude et une électrode froide ?





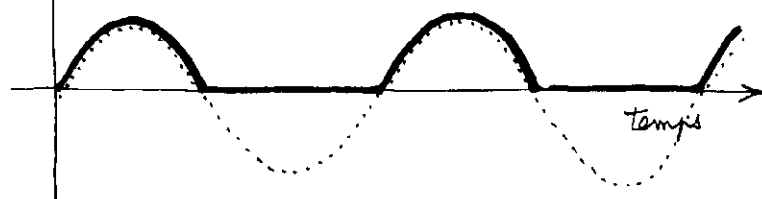
Quand l'électrode chaude est utilisée en cathode, elle émet.



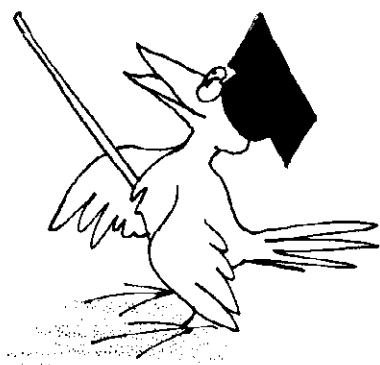
Mais quand on demande à l'électrode froide d'émettre, elle refuse, et le courant ne passe pas. Anselme, tu as fabriqué un **REDRESSEUR DE COURANT**.



intensité du courant

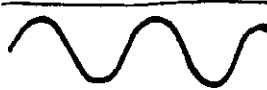


En pointillé, on a figuré en quelque sorte la "pression électronique" dans la cathode chaude et en trait noir épais le débit d'électrons de celle-ci.



Je ne sais pas pourquoi la maison est alimentée en courant alternatif, mais il est clair que cette **DIODE** peut être utilisée pour "redresser" le courant, c'est-à-dire pour transformer du courant alternatif en un courant "presque continu".

→ ENTRÉE



**REDRESSEUR**

SORTIE →

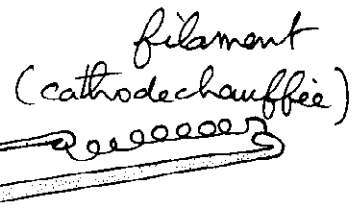
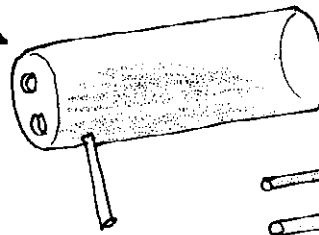
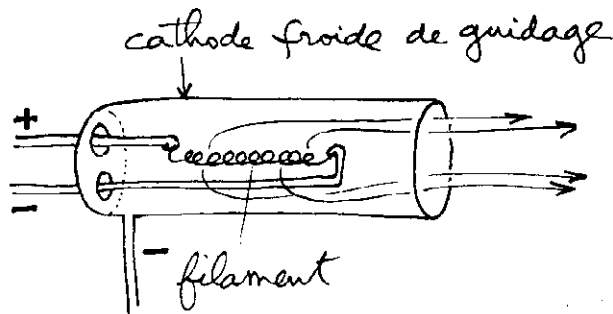


# LE CANON À ÉLECTRONS

En somme, il y a deux sortes de cathodes et seule la cathode chaude peut émettre des électrons, débiter du courant. La cathode froide n'est qu'une porteuse de charges négatives.



Ta cathode chaude émet des électrons dans toutes les directions.



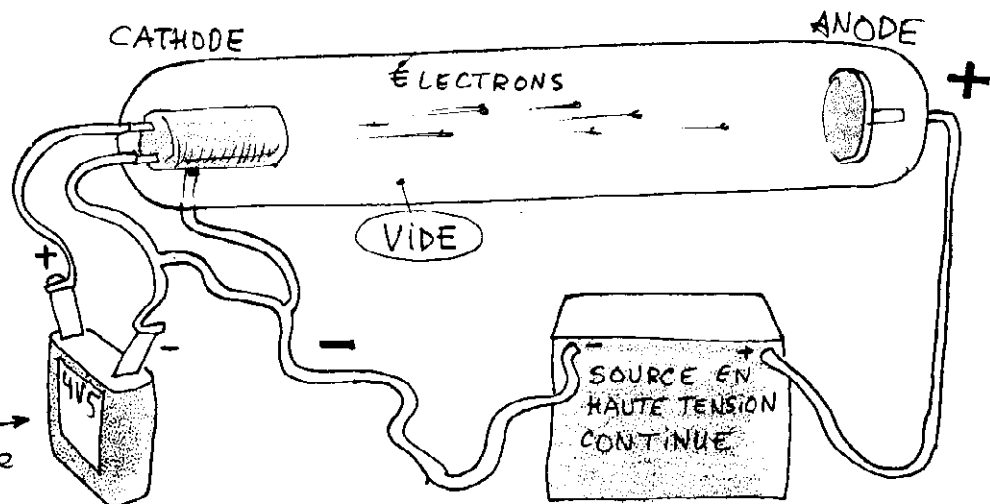
Avec cette cathode froide (dont le débit de courant est infime), Anselme contraint les électrons émis par la cathode chaude à sortir selon l'axe de ce **CANON À ÉLECTRONS** qui constitue pour eux la seule issue.



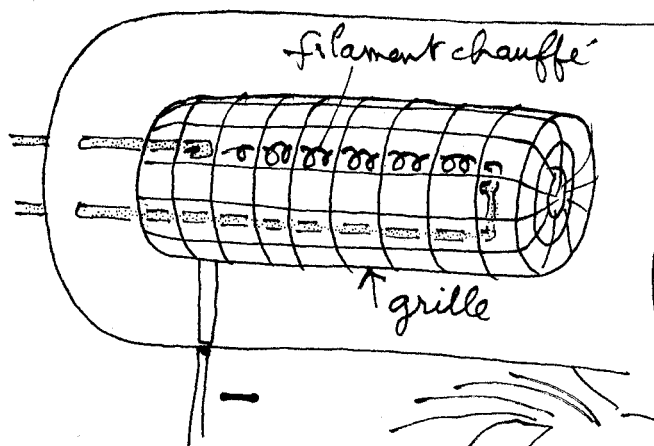
Et voilà le tout intégré dans un **TUBE À VIDE**.



Source basse tension assurant le chauffage du filament - cathode



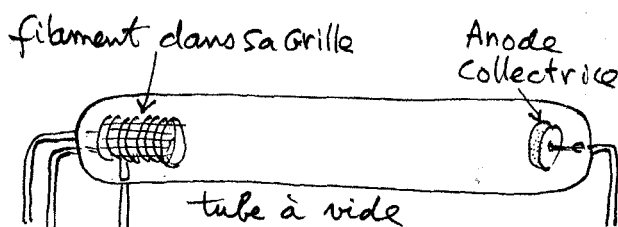
# LA TRIODE



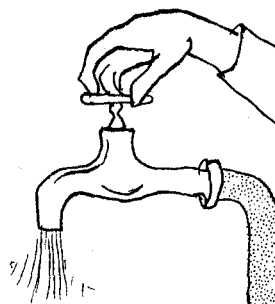
Regarde : j'ai enfermé ma cathode chaude, mon filament émetteur d'électrons, dans cette sorte de cage grillagée. Quand celle-ci n'est pas chargée, les électrons passent librement. Mais si je la charge négativement, elle repousse les électrons qui tentaient de s'arracher au filament et qui retombent. J'annule le courant.

Tu as fabriqué une **GRILLE DE COMMANDE**.

En variant la charge électrique de ta grille, à travers sa tension, tu peux moduler à volonté un courant important en dépensant une énergie infime.



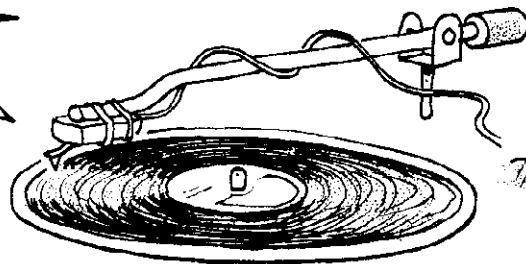
Ah oui, exactement comme quand on ouvre ou qu'on ferme un robinet.



La **TRIODE**, qui a trois électrodes : sa cathode chaude, son anode collectrice et sa grille, est la base des **AMPLIFICATEURS DE COURANT**.



Alors, l'électronique ?



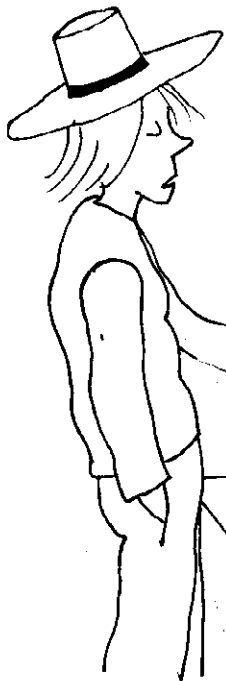
CRISTAL  
PIÉZO-ÉLECTRIQUE

DIAMANT

GRAVURE DU  
SILLON

MOUVEMENT  
DISQUE

Tiens, tu vois, ici les faibles impulsions électriques créées par un cristal piézo-électrique, solidaire du diamant de ce bras d'électrophone, servent à moduler le courant débité par une triode amplificatrice.



Eh oui, on ne se doute pas de la complexité des lois qui sont à l'œuvre dans une cuisine, une salle de bains ou un salon.



Tiens, au fait, un téléviseur, comment ça marche ?

Qu'est-ce qui fait  
briller l'écran ?

V'là autre chose.

J'arrive !

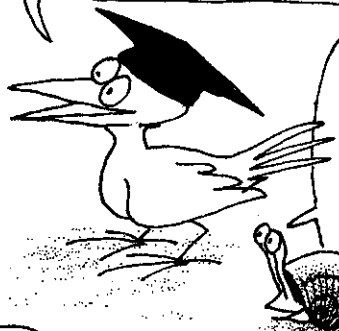


# FLUORESCENCE

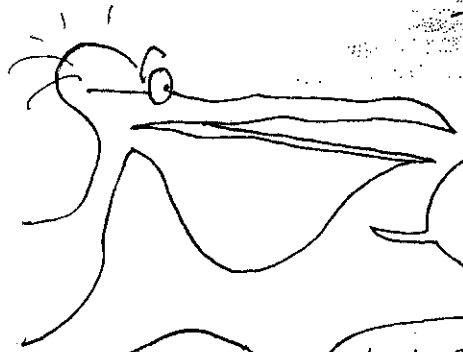


Certaines substances ont la propriété d'absorber le rayonnement sous certaines fréquences, et de réémettre selon d'autres.

Ah oui, la **FLUORESCÉINE** absorbe la lumière blanche, qui est un mélange de toutes les couleurs du prisme et a la propriété de ne réémettre que dans le vert.



Le nylon absorbe les ultra-violets et réémet dans le bleu. J'ai vu cela dans une boîte de nuit. Les gens avaient des cols de chemise tout lumineux !



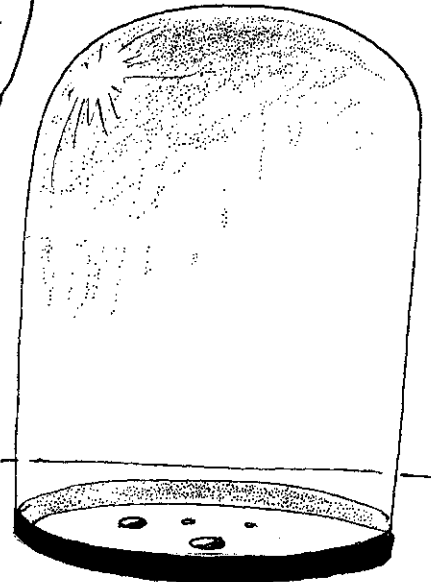
Comment, Tirésias ? vous allez dans les boîtes de nuit !

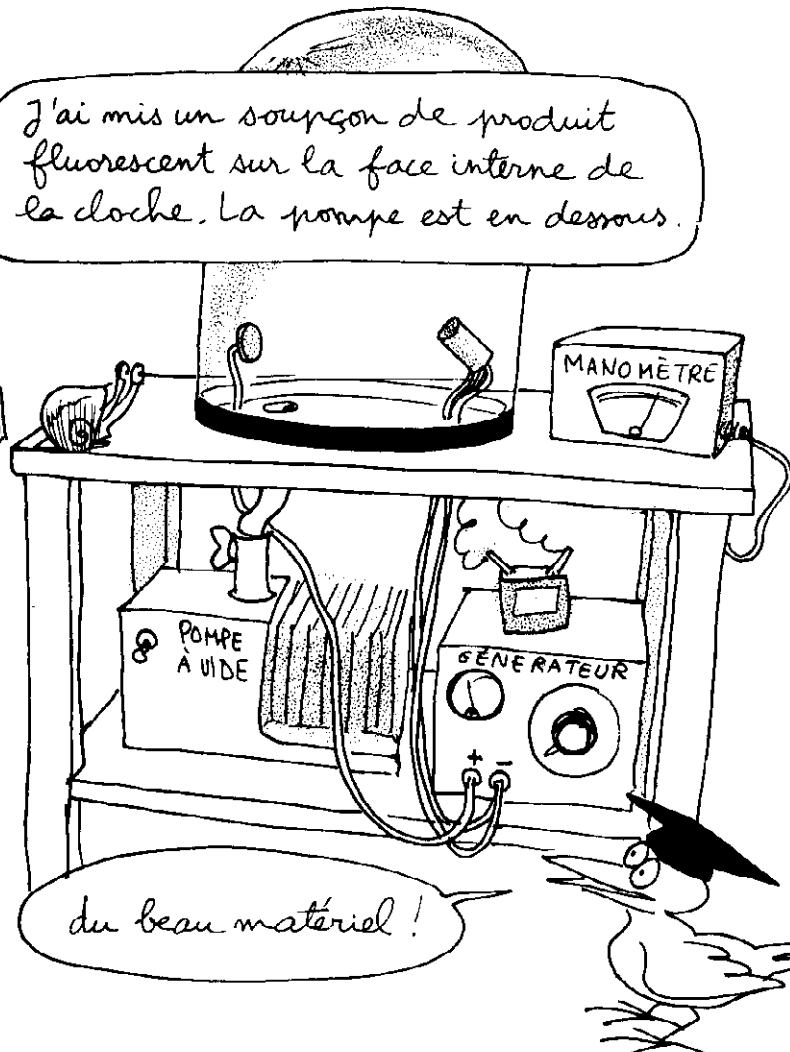


Le tube au néon est tapissé intérieurement d'un produit qui réagit à l'inverse de la fluorescéine. Il absorbe la lumière bleue émise par le néon et réémet de la lumière blanche.

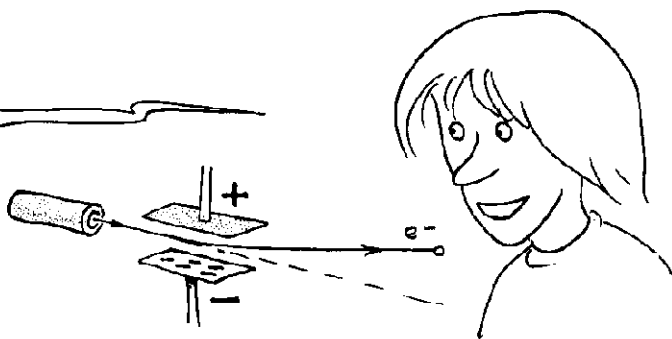


J'ai trouvé une cloche à vide. Ça sera plus commode pour les expériences que le tube à gaz.

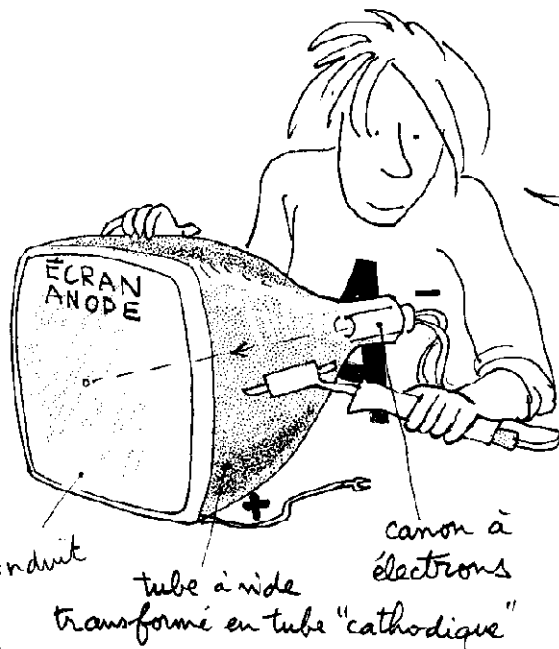
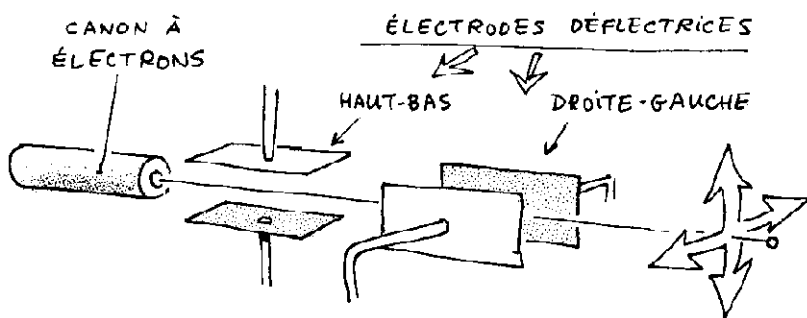




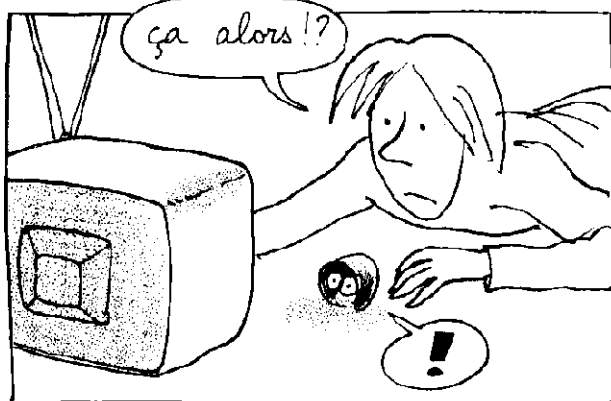
Dans le canon à électrons, je pouvais canaliser les électrons émis par un filament. Des cathodes froides peuvent alors me permettre de défléchir à volonté un fin pinceau d'électrons.



Avec deux jeux d'électrodes, on obtient un contrôle complet et précis du pinceau



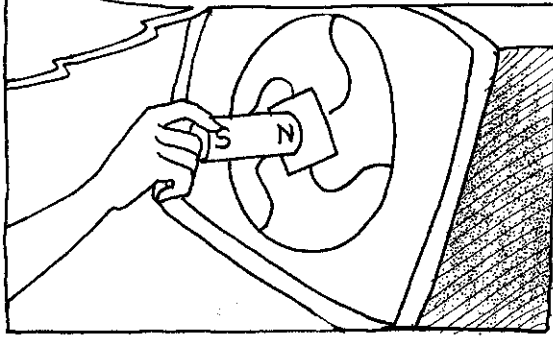
Ce téléviseur comporte une modification adéquate de la géométrie de la cloche à vide.



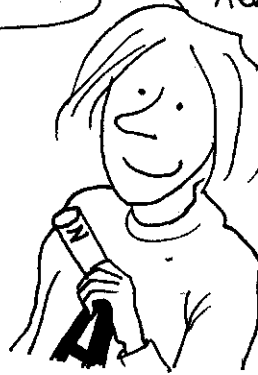
Sophie! il faut absolument que tu viennes voir ça c'est super!

demain... je dors

quand j'applique cet aimant sur  
l'écran, l'image se tord !



ça c'est le téléviseur noir et blanc.  
Allons voir ce que cela donne sur  
le téléviseur couleur.

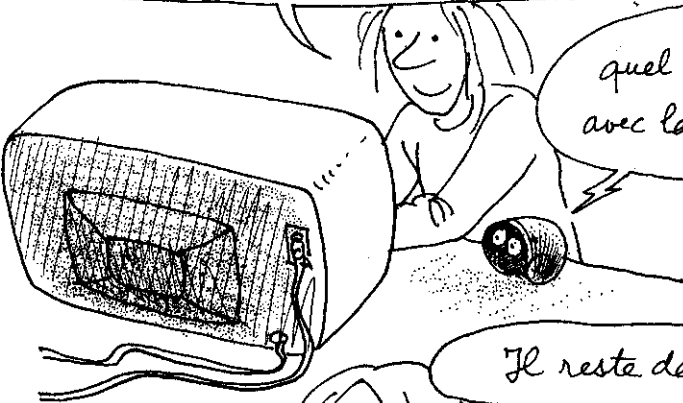


qu'est ce qui se passe ?



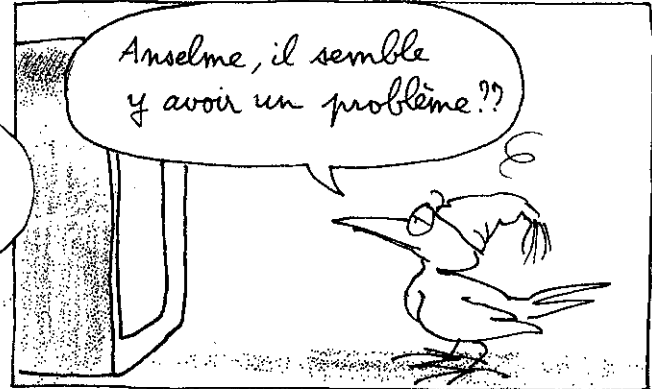
Oh, c'est comme d'habitude.

ça fait des irisations superbes !



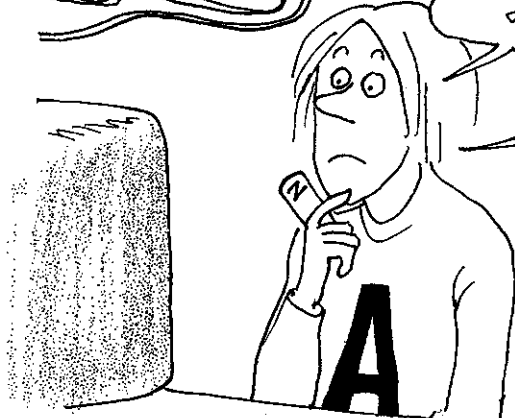
quel jeu  
avec la couleur !

Anselme, il semble  
y avoir un problème ??



Il reste des taches colorées sur l'écran !

ça ne s'en va  
pas. Misère...

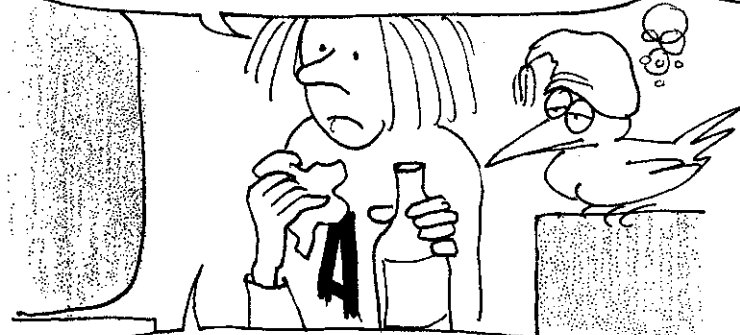


ça me rappelle quand  
on avait fait de la chimie  
sur le tapis du salon.



Inutile d'essayer d'enlever ces  
taches : elles sont A L'INTÉRIEUR !

il faut croire qu'aujourd'hui les dieux  
de la science étaient contre nous.



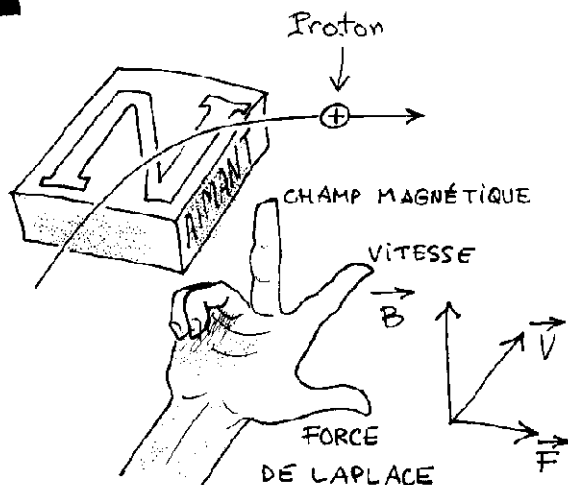
mais comment fait-on pour nettoyer  
l'INTÉRIEUR d'un tube de télévision ?

oui, demain  
on y verra  
plus clair.



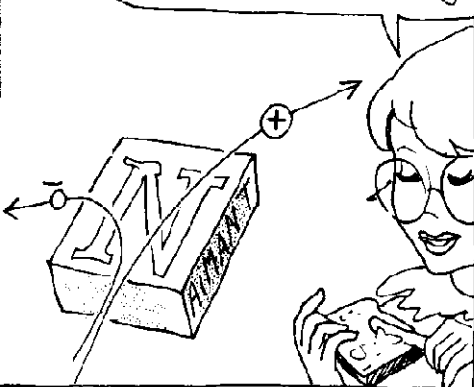
# LA FORCE DE LAPLACE

C'est simple : toute particule chargée qui déboule en coupant les lignes de force d'un champ magnétique subit une force correspondant à la **RÈGLE DES TROIS DOIGTS**.

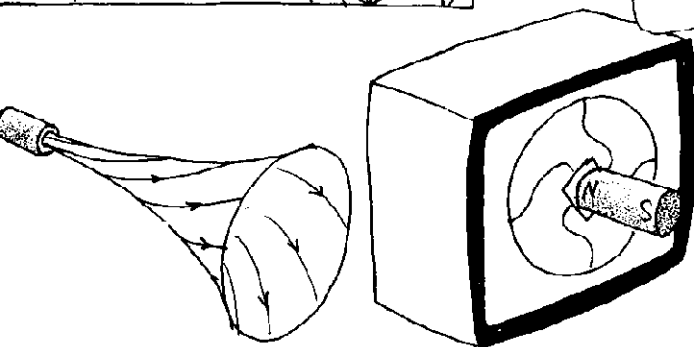
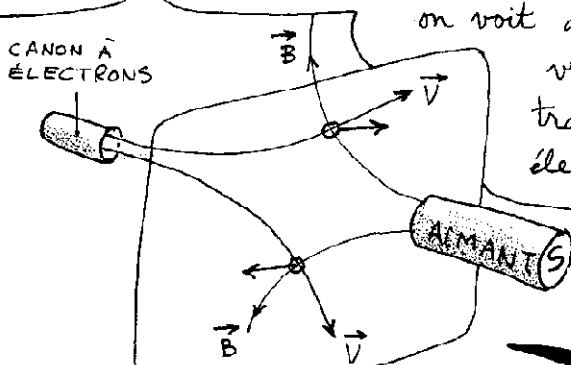


oui, mais quand il s'agit d'électrons, chargés négativement ?

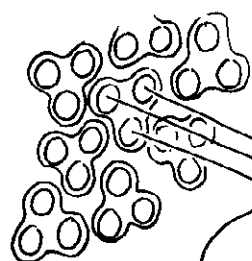
alors la force change de sens.



en appliquant cela au téléviseur, on voit que l'aimant vire les trajectoires électroniques



... d'où cette torsion de l'image sur l'écran.



L'écran d'un téléviseur couleur porte des séries de 3 pigments qui, frappés par les électrons, réagissent en donnant respectivement une lumière bleue, rouge et verte<sup>(\*)</sup>. Le repérage doit être extrêmement précis. Or ton aimant a créé une aimantation résiduelle dans ces pigments, qui dévie les électrons en créant ces irisations colorées.

Alors, tu veux dire que le tube est fichu ?

Non, mais il va falloir enlever le léger magnétisme résiduel que tu as créé dans ces pigments.

Et comment supprime-t-on cela ?

Mais, grands dieux, qu'est-ce qu'elle fabrique ?

Sophie crée un champ magnétique variable, qu'elle fait décroître en éloignant le crayon. Et voilà !

Et voilà...

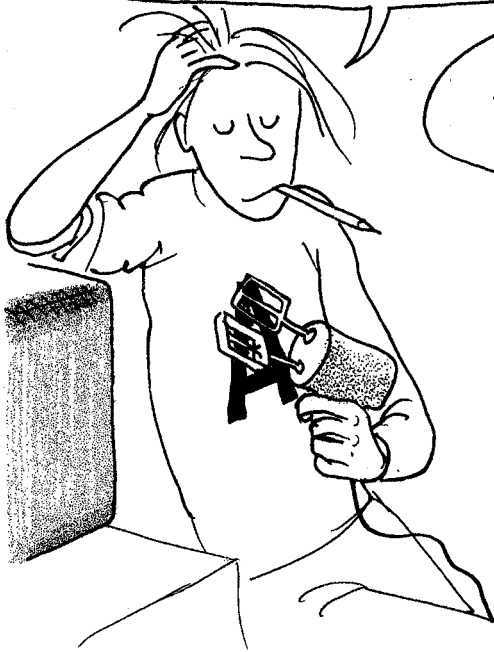
Ce phénomène sera expliqué plus loin  
La Direction

(\*) En les combinant, on peut obtenir toutes les couleurs de l'arc-en-ciel.

Bon, d'accord, l'écran est propre, mais je ne sais toujours pas comment l'énergie électrique nous parvient à domicile ni comment marche un simple batteur...

Devine. Tu as tout ce dont tu as besoin dans la maison.

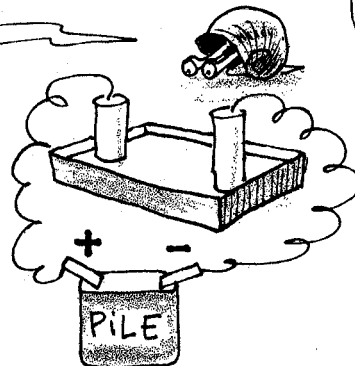
Elle en a de bonnes. Qu'est-ce que j'ai, ici ? Des aimants, du fil électrique, du sel, de l'eau. Il n'y a même pas de quoi faire une pile...



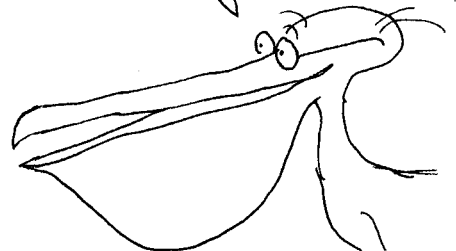
Est-ce que le courant passe dans les liquides, d'ailleurs ?

# ELECTROLYTES

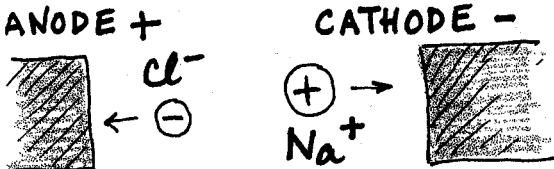
Bon. Dans les métaux, il y a un essaim d'électrons libres qui ne demandent qu'à se mouvoir. Pour se prêter au passage du courant, les gaz doivent se transformer en plasma. Mais, dans les **LIQUIDES** ?



Je suppose qu'il y a des électrons libres ?



Quand on dissout du sel de cuisine, du chlorure de sodium  $\text{Cl Na}$  dans de l'eau, les atomes se dispersent dans le liquide, le chlore emportant un électron chipé au sodium. Cet **ION** chlore  $\text{Cl}^-$  migre vers l'anode, tandis que l'ion  $\text{Na}^+$  migre vers la cathode.



*La Direction*

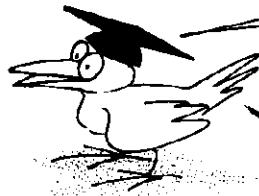
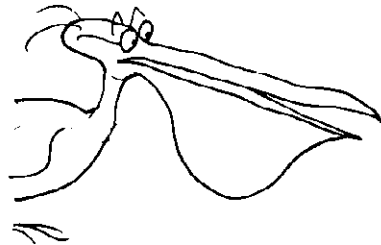


Bref, dans les liquides, le courant électrique n'est pas dû à un mouvement d'électrons libres, comme dans les métaux, mais à un **TRANSPORT D'IONS**.



Et qu'est-ce qui arrive à ces ions ?  
Ils pénètrent dans les électrodes ?

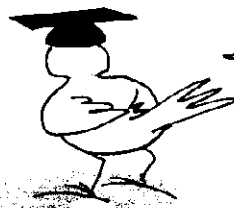
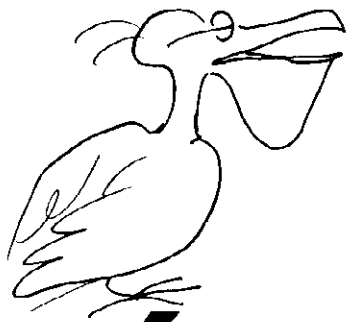
Non, l'ion chlore abandonne son électron à l'anode et un autre électron, émis par la cathode vient neutraliser l'ion sodium...



...et la boucle est bouclée.

Et que fait l'autre pendant ce temps ?

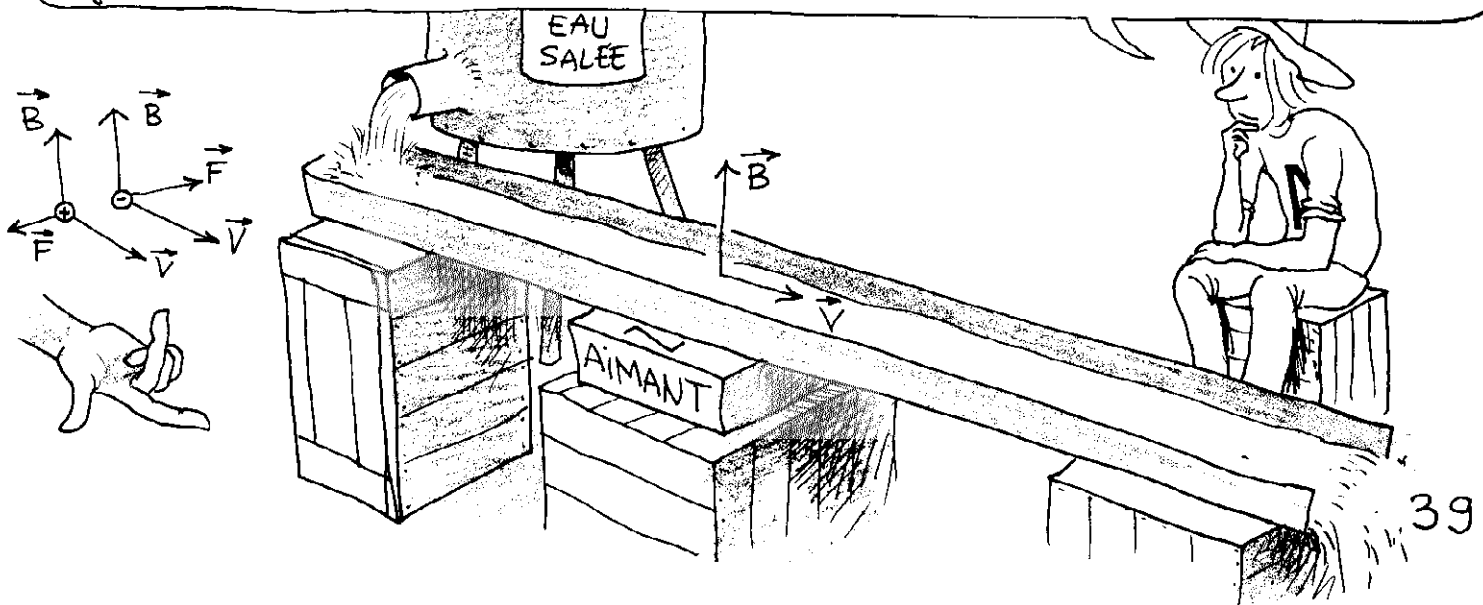
On dirait qu'il opère un retour vers l'hydraulique.

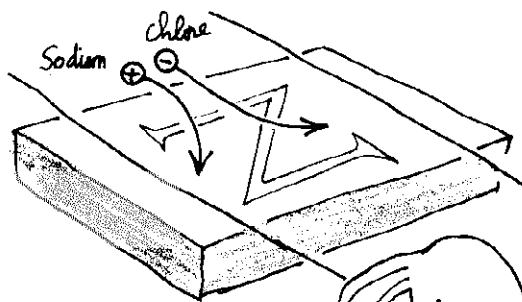


préparons les serpillières

# FORCE ÉLECTROMOTRICE

Sophie dit que toute charge électrique qui se déplace dans un champ magnétique subit la **FORCE DE LAPLACE**. logiquement, cette force doit donc agir sur les ions  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$ , contenus dans de l'eau salée en mouvement.



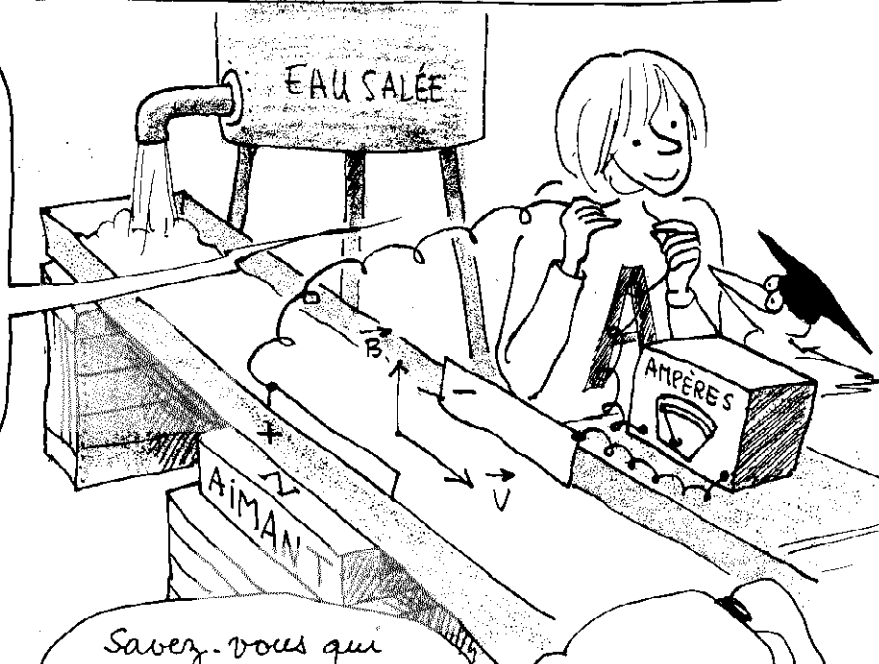


Voyons. Dans un champ magnétique vertical, dirigé de bas en haut, mes ions sodium vont tourner à droite, et mes ions chlore à gauche. Je devrais donc observer une certaine séparation des charges.



C'est une vision très schématique, car dans un liquide les ions subissent un très grand nombre de collisions avec les molécules d'eau, ce qui freine beaucoup leur progression. De plus, les forces, proportionnelles à la vitesse de l'écoulement et à l'intensité du champ magnétique, restent très faibles.

Néanmoins, mon cher Max, tu es bien d'accord qu'il y a effectivement migration des espèces chargées en sens opposés. Je devrais donc observer le passage d'un courant électrique en disposant deux électrodes dans l'écoulement, sur les deux "berges", en les reliant par un fil de cuivre.



Tu as raison, le courant passe !

Savez-vous qui a fait le premier cette expérience ?

Il n'y en a pas beaucoup, mais ça passe.

non...

C'est l'anglais Michael Faraday, en 1831. Il se servit du mouvement de l'eau saumâtre de la Tamise, au moment de la marée et... de la composante verticale du champ magnétique terrestre : à peine un dixième de gauss.\* Il inventa ainsi ce type de générateur électrique, dit **MAGNÉTOHYDRODYNAMIQUE**, en abrégé : **MHD**.

Mais un tel type de générateur a une puissance ridicule...

L'eau n'est peut-être pas le meilleur ingrédient pour créer un générateur électrique.

alors, que faut-il utiliser ? du cuivre en fusion ?

Pourquoi tiens-tu absolument à utiliser un liquide ?

# LA ROUE DE BARLOW

Sophie a tout à fait raison. En faisant tourner ce disque de métal dans l'entrefer d'un aimant, je crée une migration des charges électriques, en l'occurrence ici des électrons, puisque les charges positives du métal ne peuvent se déplacer en son sein.

Voilà donc notre premier **GÉNÉRATEUR ÉLECTRIQUE**

\* Le moindre aimant de couturière fait une centaine de gauss.



Tu vois, les charges sont comme des véhicules qui suivent une autoroute, qui représente le mouvement du métal. Les charges positives sont de lourds camions incapables de tourner à droite ou à gauche, ou de changer de vitesse. Ils sont liés au flot des véhicules, liés entre eux. Les électrons sont des petits motocyclistes, qui, au départ, suivent également le flot.

Eh! tu as vu comme il m'a coupé la route!?!/

pas gênés, ces électrons!

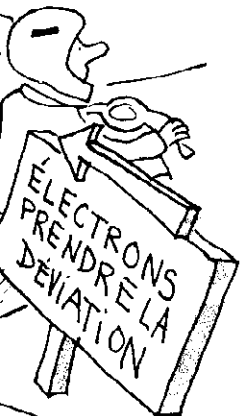
Ils me font perdre ma vitesse!!

Eh, j'ai pas que ça à faire!!

Et voilà soudain ce qui se passe!

Encore des qui s'énervent bêtement!

tire-toi de là eh, banane!



NOYAU DE MÉTAL

BING

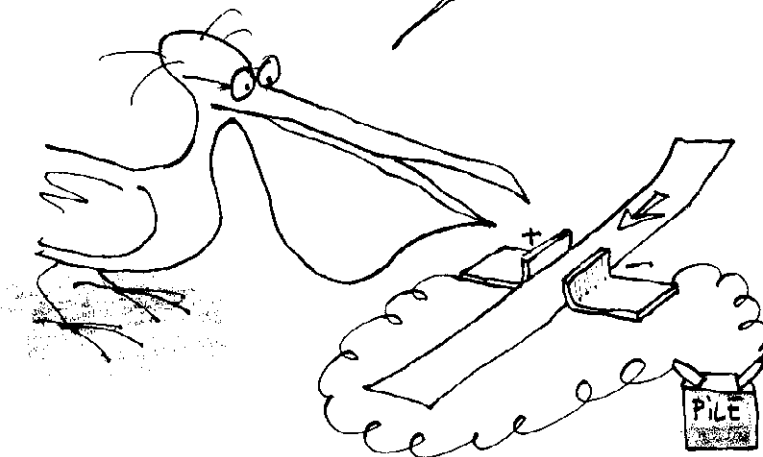
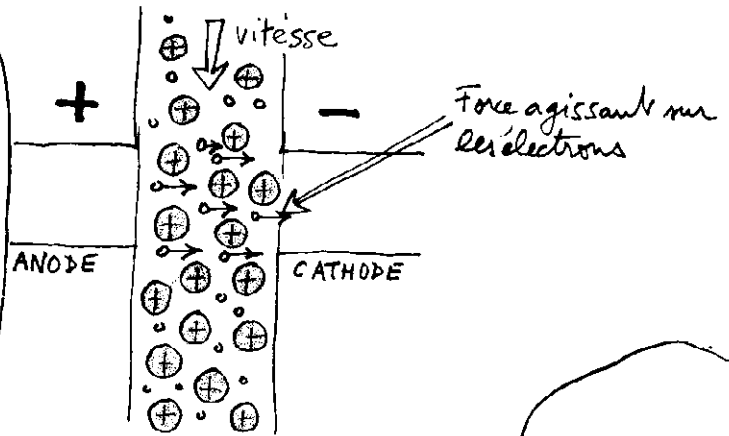
!!!

NOV

Voici donc, au niveau microscopique, l'explication du fait qu'il est nécessaire d'exercer une force, de fournir un **TRAVAIL** pour produire de l'énergie électrique.



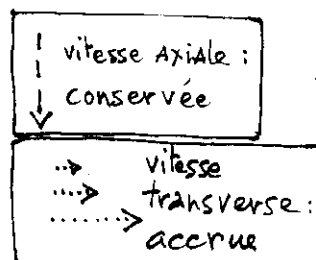
Otez-moi d'un doute. Oublions le champ magnétique. Est-ce que je n'obtiendrais pas un freinage identique en provoquant cette dérivation latérale du flux d'électrons en direction des électrodes, mais à l'aide, cette fois, d'un champ électrique créé par un générateur?



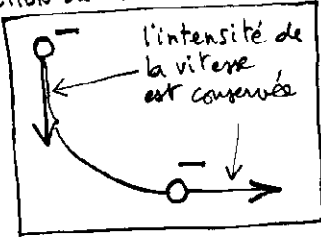
Non, Léon, cela serait foncièrement différent.

Quand tu agis sur une charge électrique, noyée au milieu d'un flot d'atomes se déplaçant à une vitesse  $\vec{V}_0$ , à l'aide d'une force électrique créée par un générateur, tu lui communique une composante transverse de vitesse  $\vec{V}_T$ . Mais la composante axiale  $\vec{V}_0$  n'est pas modifiée. Un générateur communique donc de l'énergie aux charges électriques.

ACTION DU CHAMP ÉLECTRIQUE



# ACTION DU CHAMP MAGNÉTIQUE



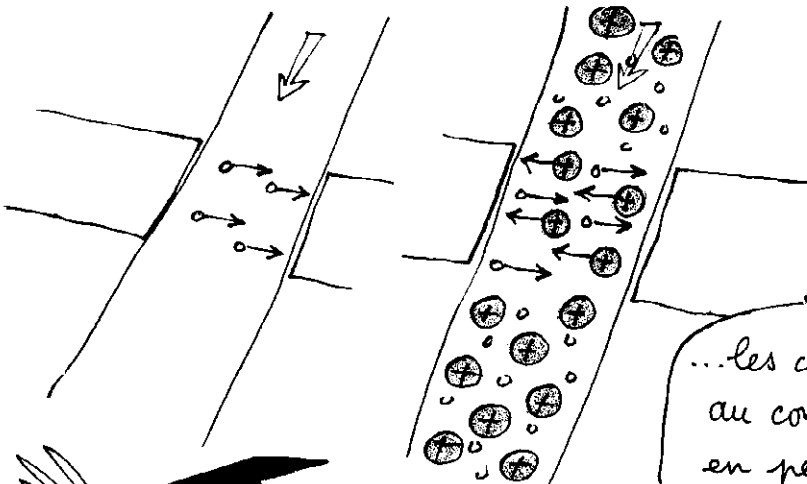
Un champ magnétique transversal, au contraire, ne modifie pas l'énergie cinétique  $\frac{1}{2} m v^2$  de la particule chargée. La direction de la vitesse change mais non son intensité. Dans ce cas, la composante axiale de cette vitesse, parallèle au flux général, diminue. D'où un freinage du conducteur.



Bon, mais dans les deux cas de figure, je sollicite transversalement ma population d'électrons libres...

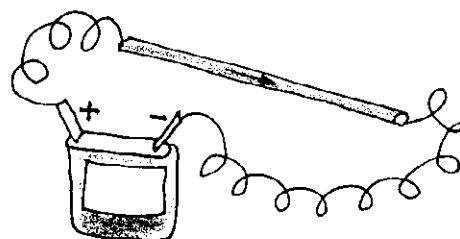
... donc je devrais observer une force transverse

Léon, tu oublies que la **FORCE DE LAPLACE** agit tout autant sur les charges positives et que ces forces se compensent...



... les charges électriques liées rigidement au conducteur transmettent cette force en permanence, alors que les charges libres retransmettent cette force périodiquement par le jeu des collisions.

Ce qui fait que lorsque l'électricité s'écoule dans un fil, elle ne tire pas dessus.

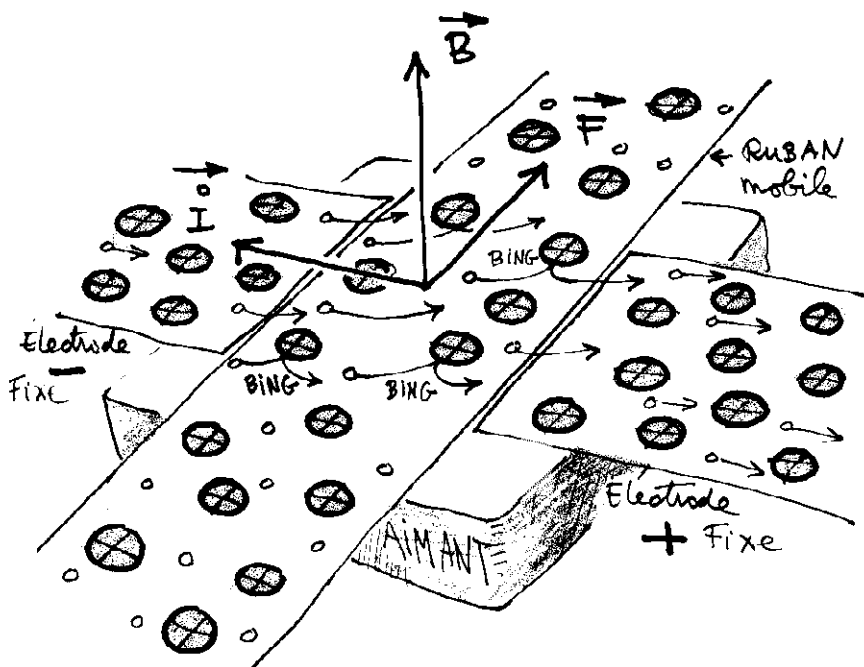


# LE MOTEUR ÉLECTRIQUE



Tout cela me donne une idée. En faisant circuler un courant transversalement au ruban conducteur, je ne crée pas de force, c'est entendu, mais que se passe-t-il si je combine les deux effets : le passage du courant grâce au générateur et la rotation du vecteur vitesse due à l'effet d'un champ magnétique perpendiculaire à la vitesse de déplacement des charges ?

Le générateur va mettre en mouvement les électrons, qui vont tendre à traverser le ruban en passant de la cathode à l'anode. Mais le champ magnétique, en incurvant leur trajectoire, transmettra une partie de l'impulsion acquise selon l'axe de la bande, laquelle subira ainsi une force.

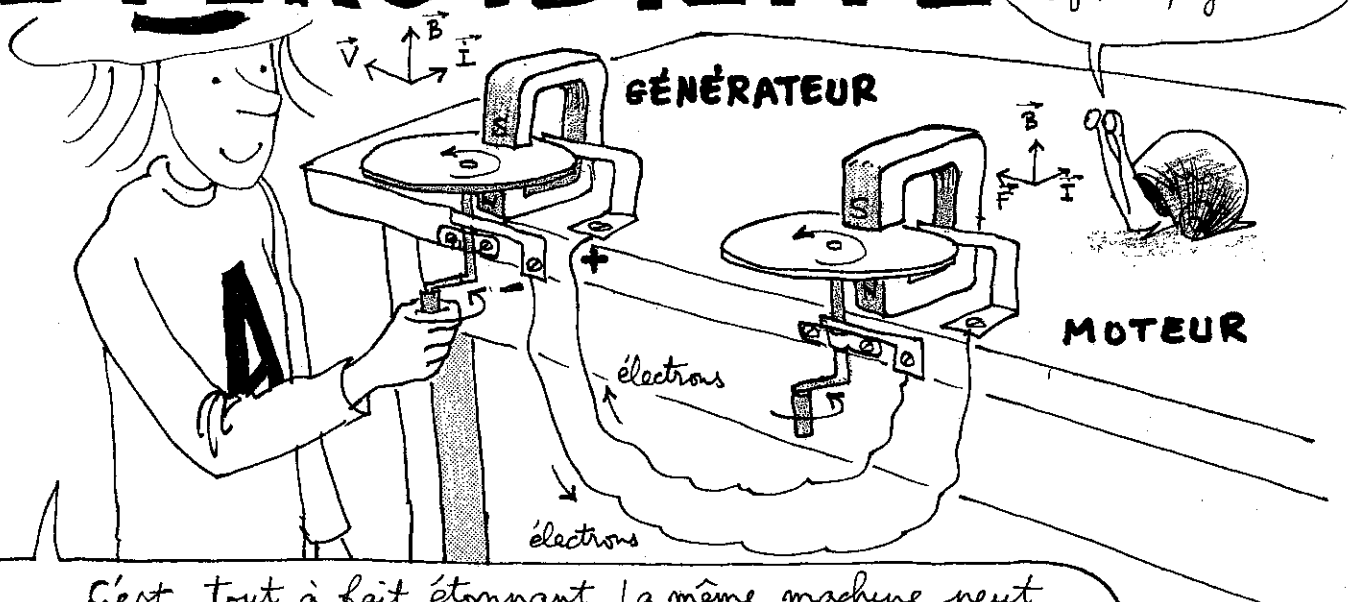


L'analyse du comportement microscopique, à l'échelle de l'atome, permet de déduire le comportement macroscopique, à l'échelle de la manip.



# RÉVERSIBILITÉ

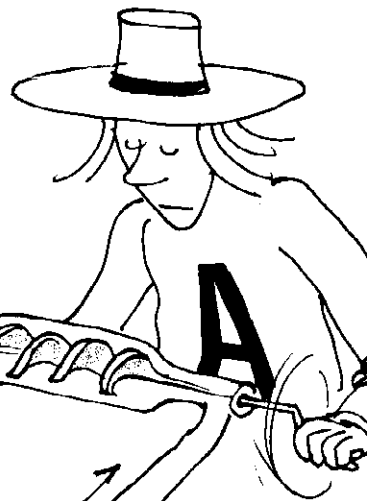
En mettant en jeu uniquement la loi définie page 40.



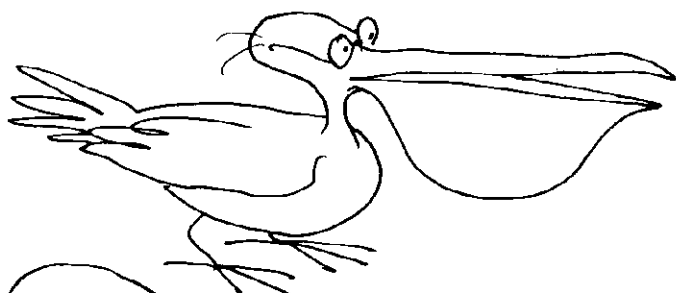
C'est tout à fait étonnant. La même machine peut être utilisée comme générateur de courant, ou comme moteur.



Vues sous cet angle, les machines électromagnétiques sont un moyen commode de transmettre de l'énergie.



on peut faire la même chose avec une turbine.



Voyons, en reliant les manivelles entre elles, on devrait pouvoir réaliser un **MOUVEMENT PERPÉTUEL**.

Léon, tu sais bien que dans des conduites, l'énergie se dissipe par suite des frottements.

Dans les conducteurs électriques, immobiles ou en mouvement, le mouvement des charges électriques s'accompagne de nombreuses collisions avec les particules non chargées.

avancez !

même en stationnement on est embêté !

un atome tout neuf vous allez voir !

tu as vu, celui-là, comme il m'a coupé la route

chéri, reste calme.

regardez cela !  
mais regardez cela !

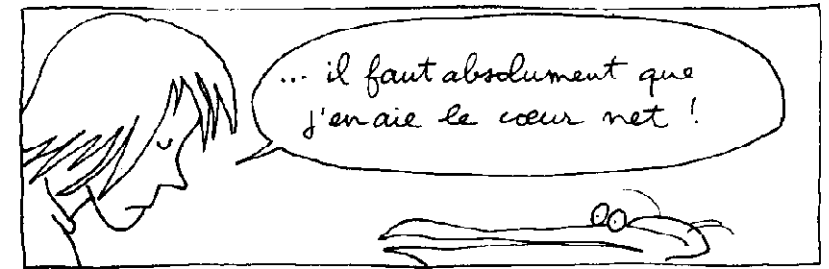
Ils traversent n'importe comment !

# RELATIVITÉ

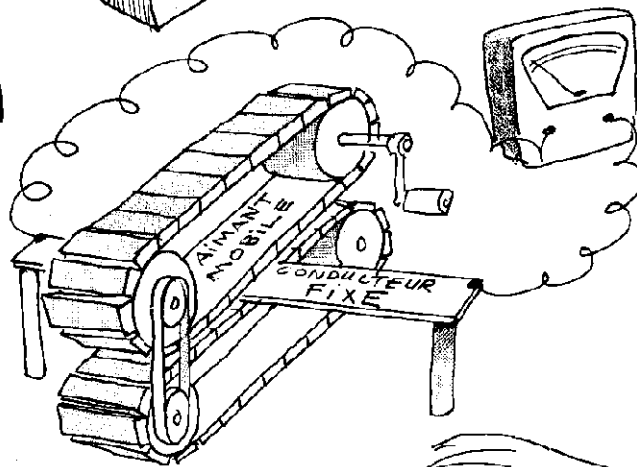
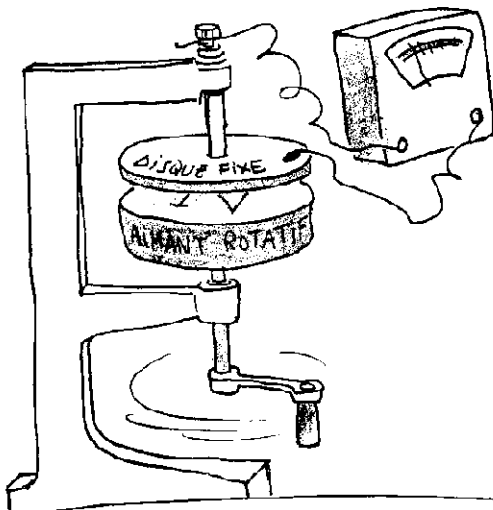
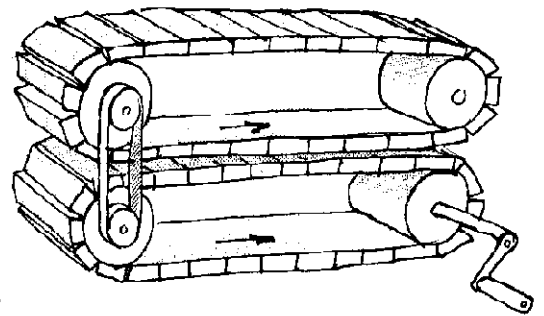
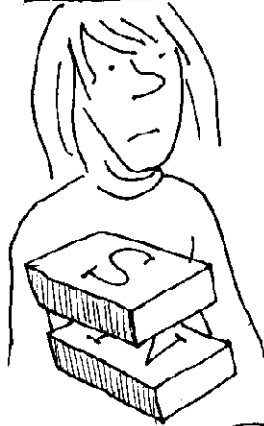
Tirésias, tu sais, il me vient une bien drôle d'idée...



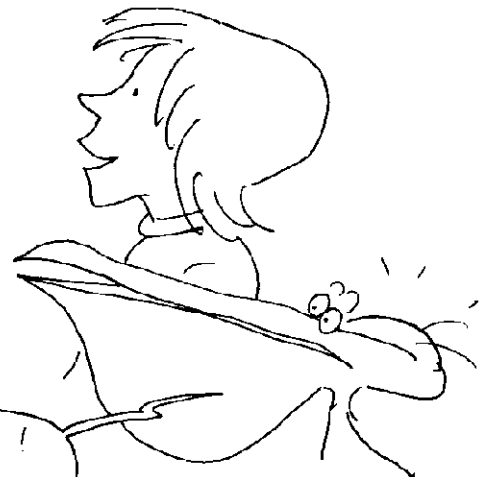
J'ai collé ces ensembles d'aimants sur ces courroies.



... il faut absolument que j'en aie le cœur net !



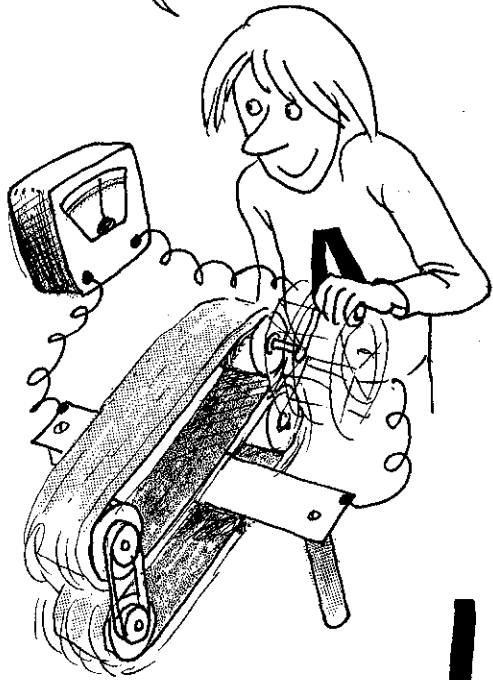
Au lieu de déplacer un conducteur dans les lignes de force d'un champ magnétique (constant dans la région d'interaction), j'immobilise le conducteur et .... je fais tourner le champ !



complètement diabolique !

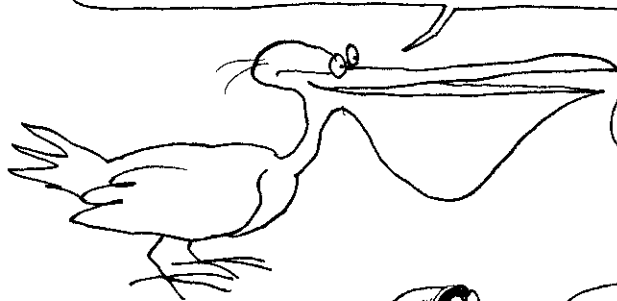
Regarde : je produis  
du courant, c'est net !

Cela veut simplement dire que, dans  
la **FORCE DE LAPLACE**, ce qui compte,  
c'est la vitesse des charges et de l'aimant  
L'UN PAR RAPPORT A L'AUTRE.



# LES AIMANTS

Sophie, qu'est-ce que c'est qu'un **CHAMP MAGNÉTIQUE** ?



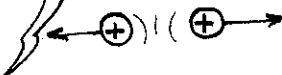
La bonne question  
serait : A QUOI ÇA SERT ?



Comment, à quoi ça sert ?



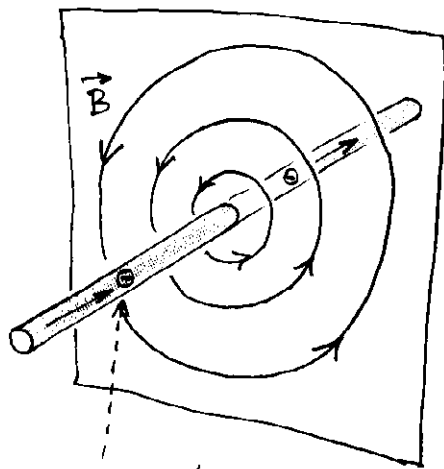
Deux charges électriques au repos  
s'attirent ou se repoussent, selon  
qu'elles sont de signes contraires  
ou de même signe.



et elles subissent aussi une  
force quand elles se meuvent  
par rapport aux lignes de force  
d'un champ magnétique.

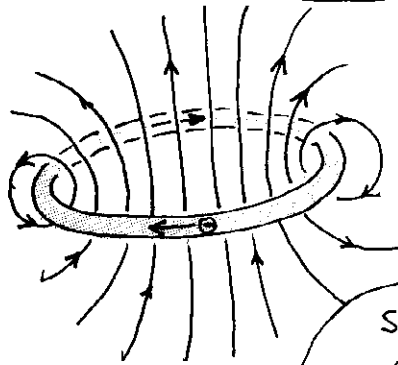
D'accord, mais qu'est-ce qui  
crée ce champ magnétique ?





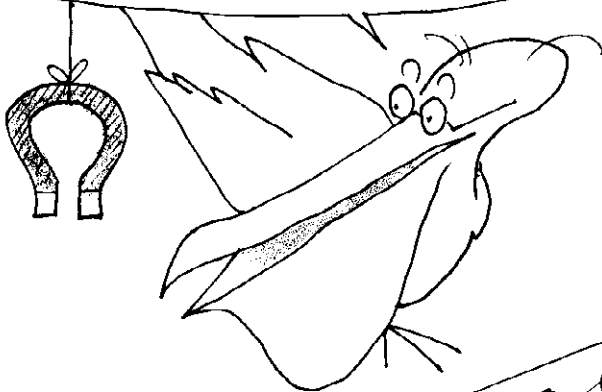
mouvement  
des électrons

c'est le  
courant

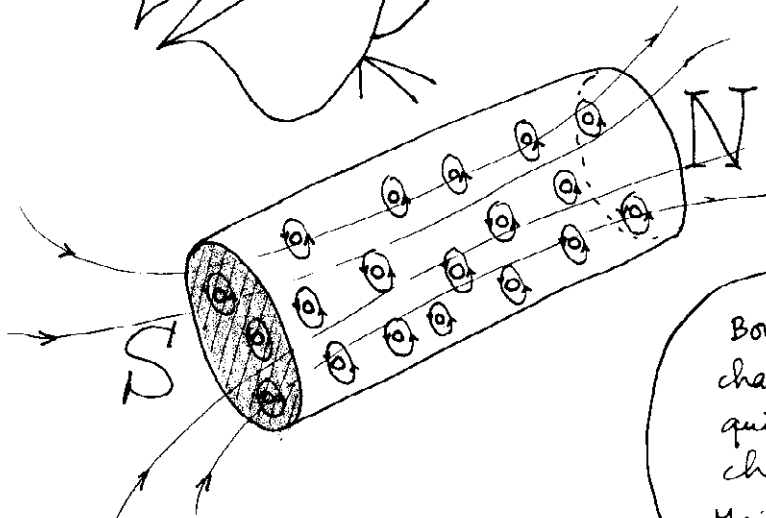


Sans oublier qu'à cause de ces  
fichus scientifiques, le sens  
conventionnel du courant est inverse  
de celui du mouvement des électrons.

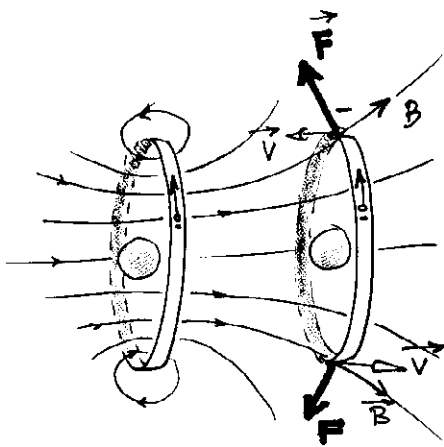
Mais il n'y a pas de courant  
dans un aimant permanent?



Chaque atome peut être considéré comme  
un aimant minuscule, dont le champ  
magnétique est créé par le mouvement  
orbital des électrons autour du noyau.  
Dans un aimant permanent ces mini-  
aimants sont parallèles entre eux

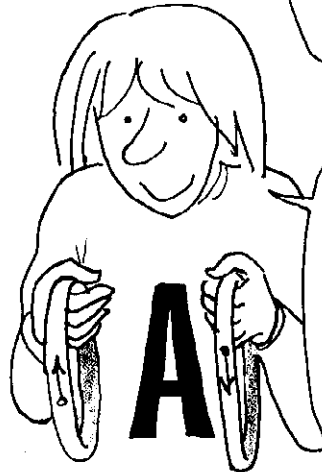
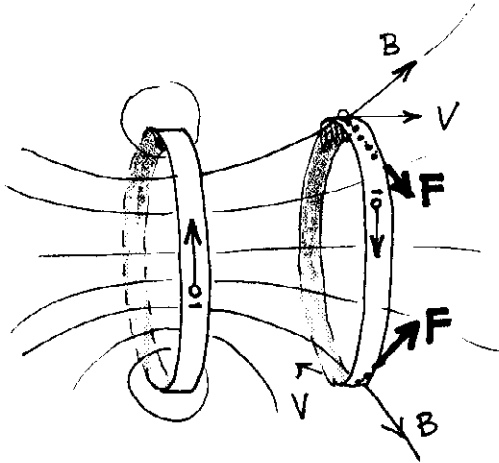


Bon, les aimants agissent sur les  
charges électriques en mouvement  
qui coupent les lignes de force du  
champ magnétique qu'ils créent.  
Mais pourquoi agissent-ils l'un sur l'autre?



Si je mets deux spires face à face, parcourues par des courants de même sens, les électrons sont soumis à une force tendant à :

- dilater chaque spire
- la rapprocher de l'autre spire.



Par contre, si j'inverse le sens de circulation des électrons dans la deuxième spire, la force de Laplace va tendre à :

- contracter chaque spire
- l'éloigner de l'autre spire.

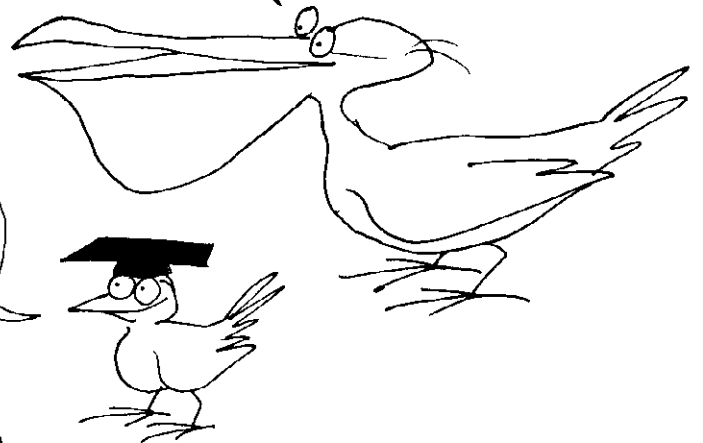
En gros, c'est comme ça que ça passe avec les atomes des deux aimants.



Mais d'après le schéma de tout à l'heure, une spire reste insensible à un champ magnétique uniforme dirigé selon son axe, non ?

De même qu'un barreau aimanté est totalement insensible à un champ magnétique uniforme dirigé selon son axe

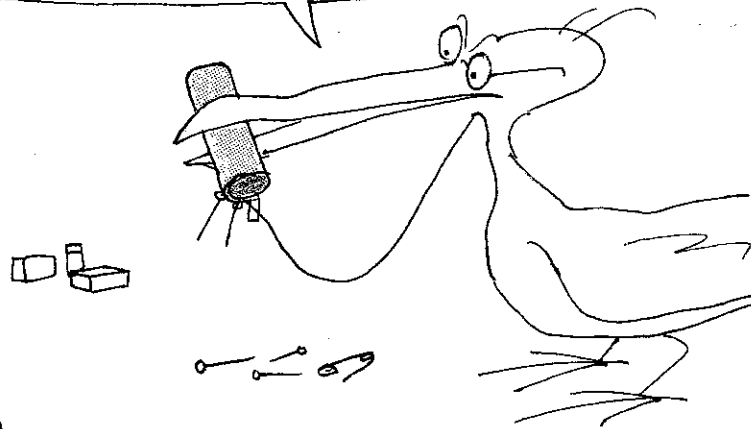
Logique, sinon, pour se propulser, il suffirait de s'accrocher à une bonne boussole.



Par contre, une spire placée dans un champ magnétique tend à tourner de telle façon que son propre champ s'aligne avec le premier. C'est le principe du **GALVANOMÈTRE À CADRE MOBILE**. Une boussole n'est rien d'autre qu'un ensemble de minuscules galvanomètres du même style.



Bon. Alors, est-ce que quelqu'un peut m'expliquer pourquoi un aimant attire le fer et non le plomb, ou le sucre ?

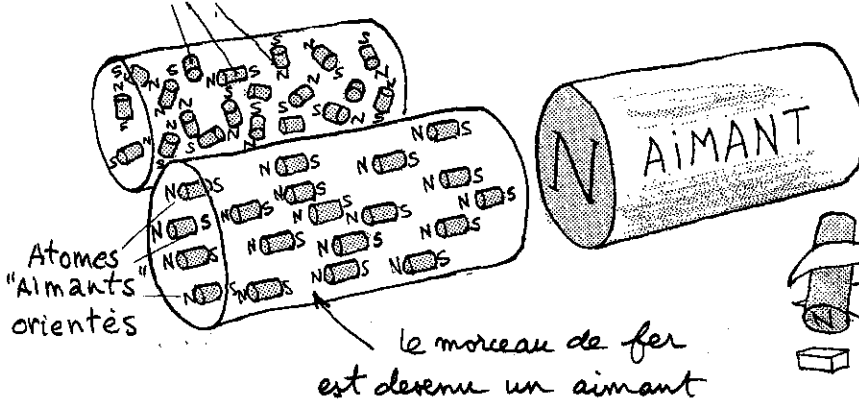


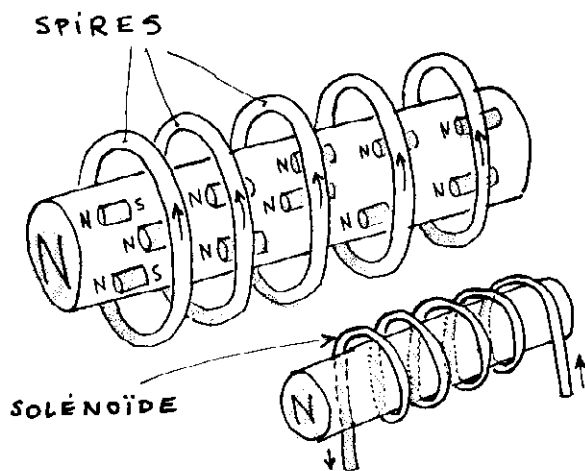
C'est simple : les atomes de fer sont aussi de petits aimants. De plus, ils jouissent d'une relative mobilité. Quand on rapproche un aimant suffisamment puissant, les atomes de fer tournent et s'alignent et le morceau de fer devient lui-même un aimant, dont le champ se superpose d'ailleurs au champ de l'aimant inducteur.



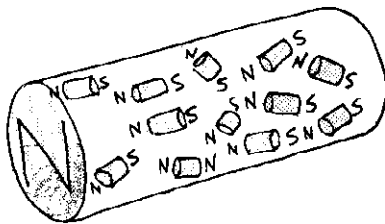
Avec le sucre, zéro

Atomes "Aimants" (orientations aléatoires)

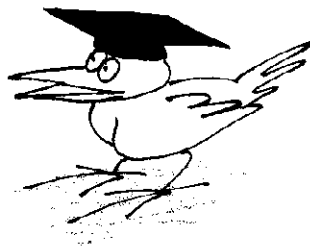




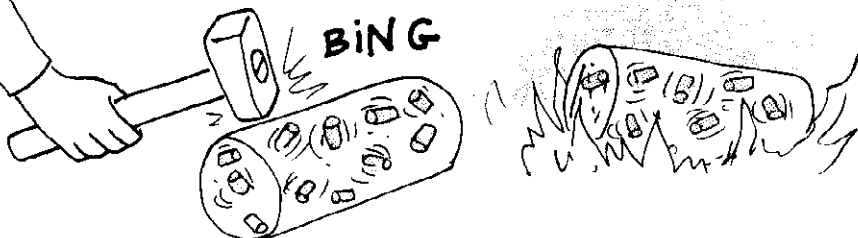
Je comprends pourquoi on met un NOYAU DE FER dans les ÉLECTRO-AIMANTS. Celui-ci renforce le champ propre créé par le système de spires.



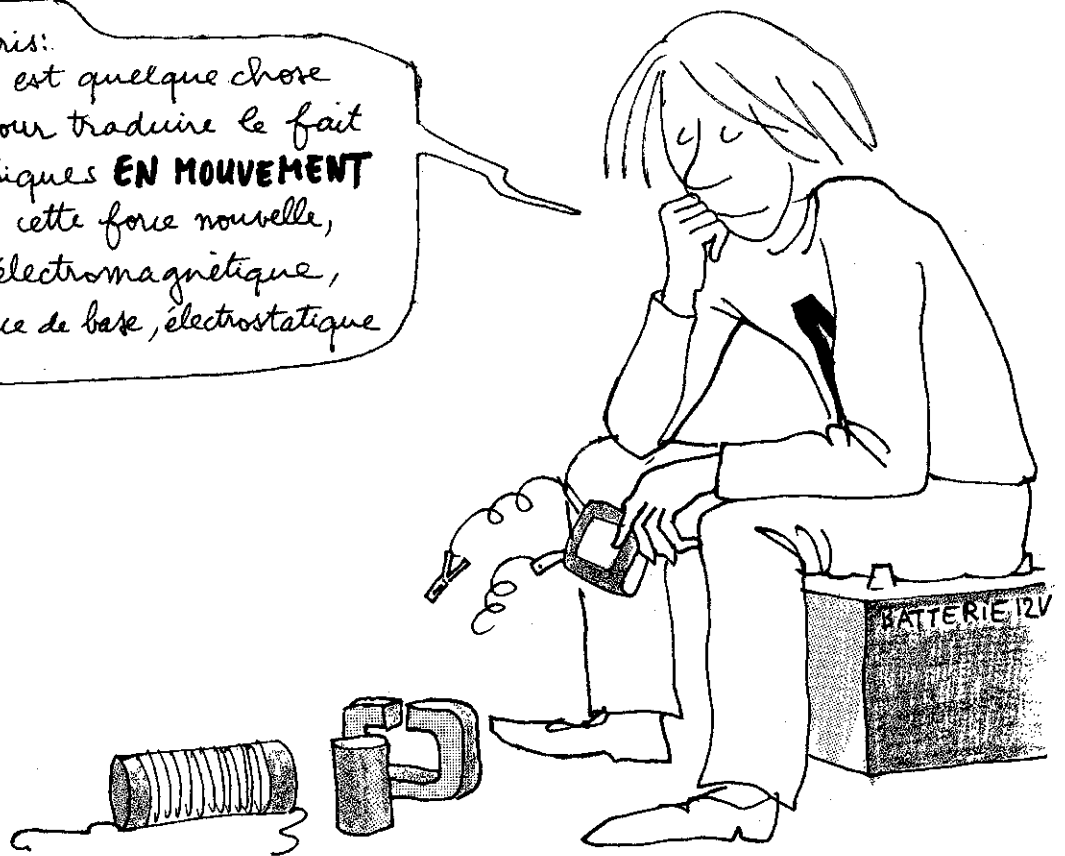
Quand on retire l'aimant magnétiseur ou le solénoïde, les atomes-aimants du fer gardent, dans une certaine mesure, leur orientation. Il subsiste un **MAGNÉTISME RÉSIDUEL**...



... que l'on pourra faire disparaître en redonnant leur mobilité aux atomes-aimants, en chauffant le fer, en le frappant, ou en le soumettant à un champ magnétique variable, comme je l'avais fait pour les pigments du tube de télévision, qui avaient été accidentellement magnétisés, à l'aide d'un petit aimant fixé sur un crayon

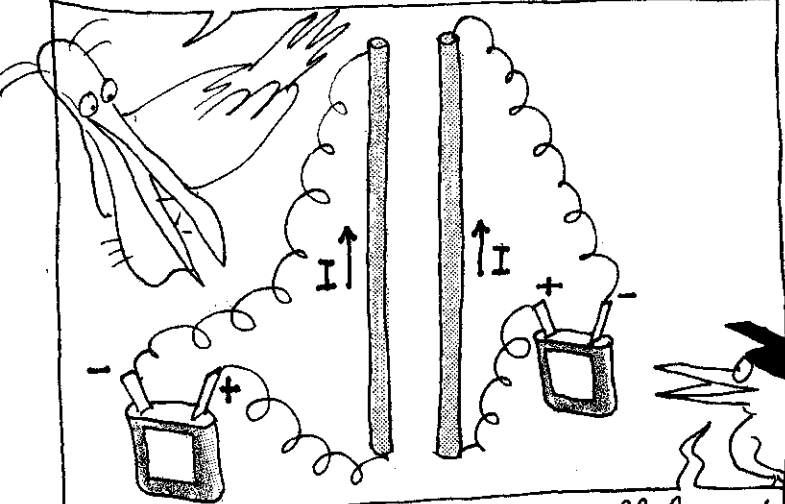


Je crois avoir compris:  
le champ magnétique est quelque chose  
qui a été inventé pour traduire le fait  
que les charges électriques **EN MOUVEMENT**  
interagissaient, et que cette force nouvelle,  
électrodynamique, ou électromagnétique,  
se surajoutait à la force de base, électrostatique



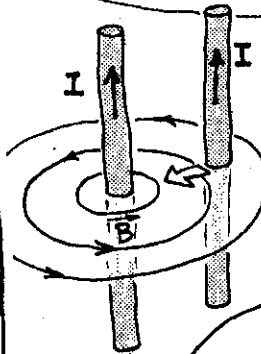
# DE NOUVEAU LA RELATIVITÉ

Comment mesurer un champ magnétique  
le plus objectivement possible ?



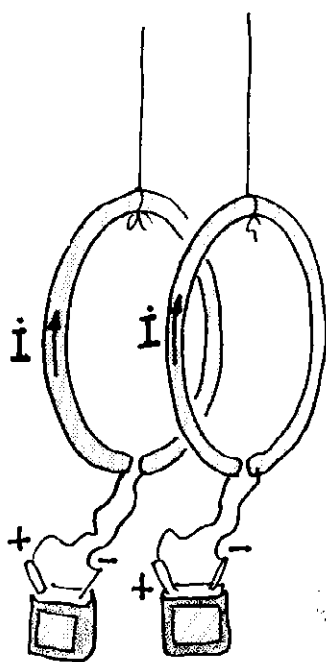
Eh bien on peut disposer parallèlement  
deux barres parcourues par le même  
courant électrique, d'intensité  $I$ .

Dans ces conditions, les deux  
barres subissent une attraction  
mutuelle égale.



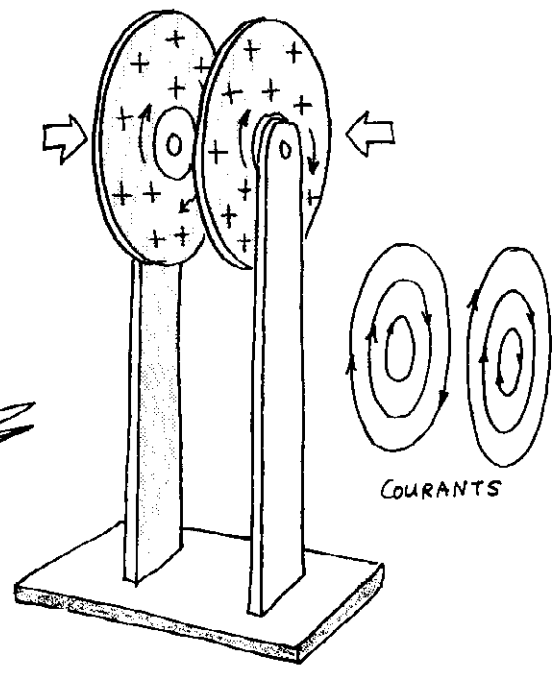
Chaque barre combine  
son propre courant avec  
le champ magnétique créé  
par l'autre barre.





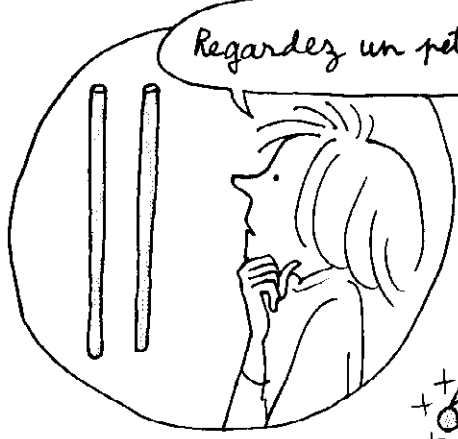
On peut enrouler ces barres, ce qui fait que deux spires parcourues par des courants parallèles s'attirent.

comme on l'a déjà vu page 51.

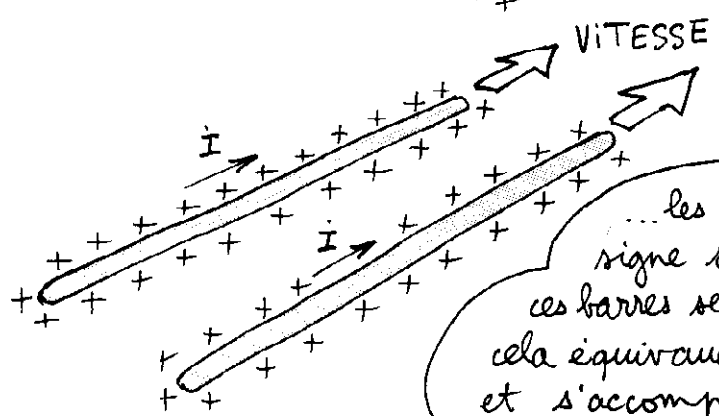
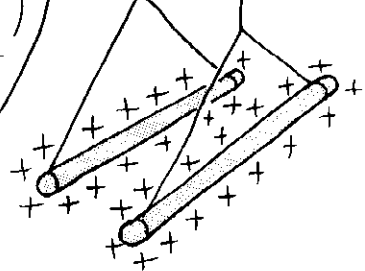


De même, on peut déposer des charges électriques de même signe sur des disques se faisant face et les faire tourner. Ceci est équivalent à des courants et s'accompagnera d'une force électromagnétique.

Regardez un petit peu cela...



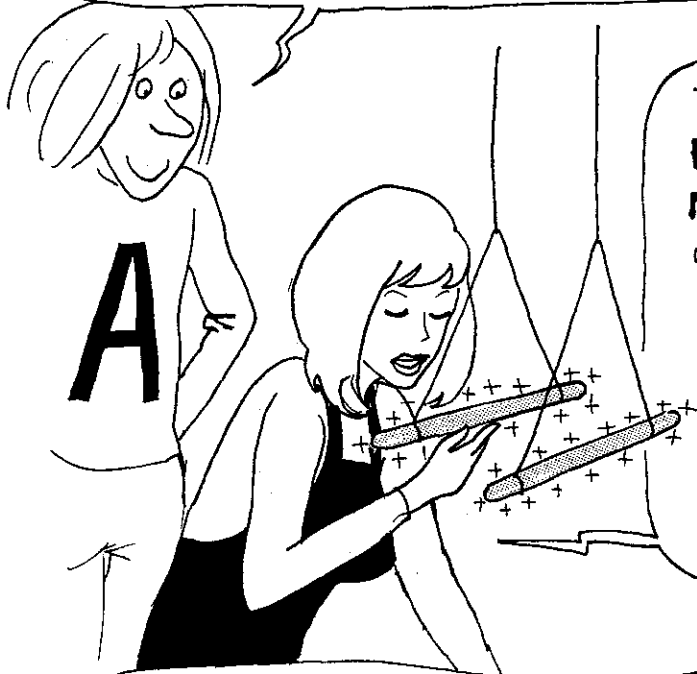
Je peux charger électriquement ces deux barres de verre ou de bakélite, en les frottant avec un chiffon de laine...



...les charges de même signe se repoussent, mais si ces barres se déplacent comme ceci, cela équivaudra à deux courants parallèles et s'accompagnera d'une légère composante attractive.



La Terre tourne autour du Soleil, qui lui-même tourne dans notre galaxie, la Voie lactée, à 234 km/s. Cette dernière se déplace peut-être par rapport à l'Univers. Sophie, c'est formidable: en pointant ces deux barres parallèles, chargées électriquement, dans toutes les directions du ciel et en mesurant la force qui s'exerce entre elles, nous devrions pouvoir déterminer dans quelle direction nous nous déplaçons dans l'Univers et à quelle vitesse!



Tu ne mesureras rien du tout! Cette **FORCE ÉLECTROMAGNÉTIQUE**, liée au **MOUVEMENT**, n'est perceptible que par un observateur qui se déplace par rapport à ces charges. Or quel que soit notre mouvement, par rapport au Soleil, par rapport à la galaxie ou au Cosmos, nous allons à la même vitesse que ces barres.

L'électromagnétisme est d'essence relativiste

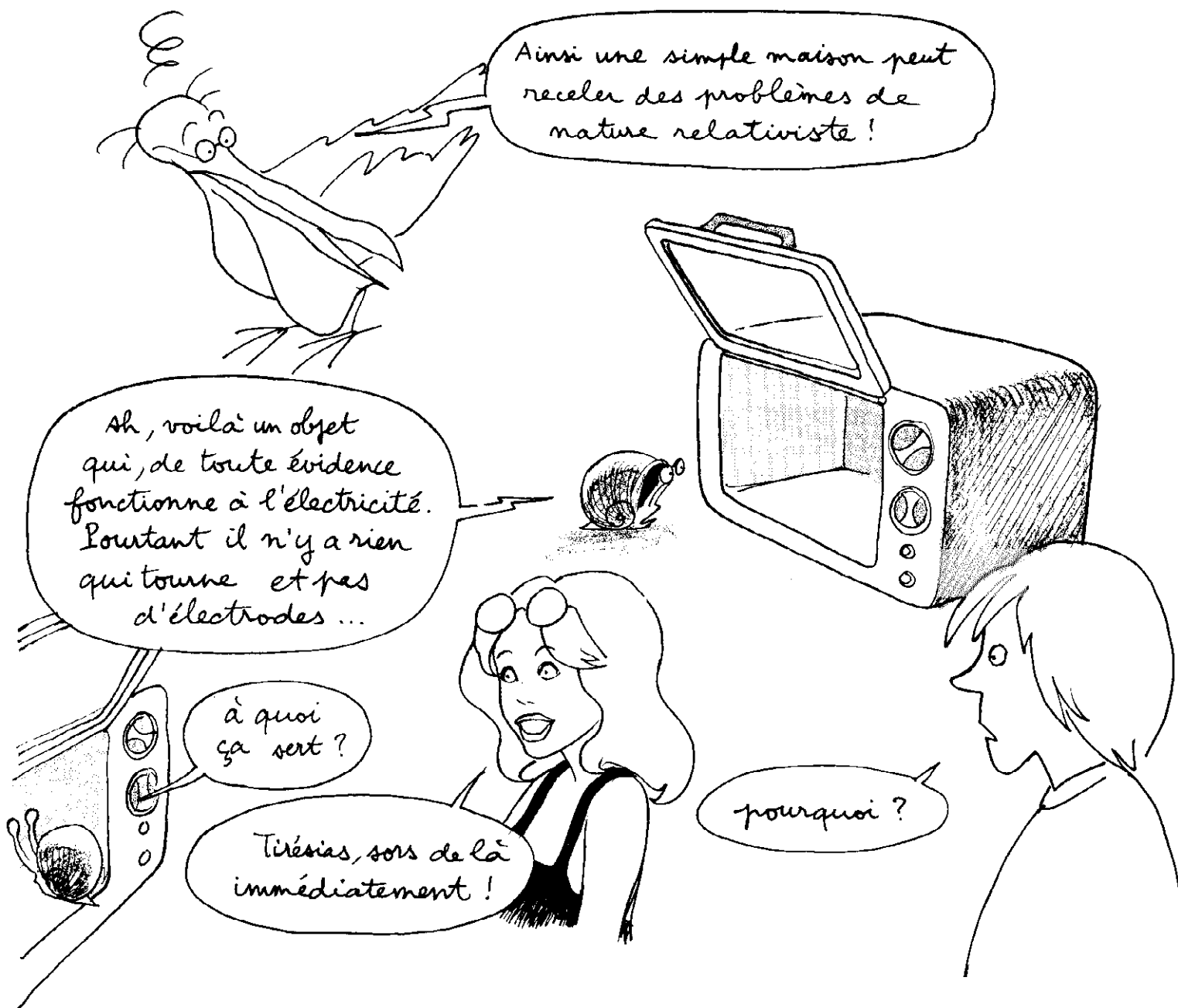


Il est vrai que l'expérience suggérée par Anselme rappelle celle faite par MICHELSON(\*) au début du siècle, et qui consistait à mesurer la vitesse de la lumière dans toutes les directions, pour découvrir le mouvement absolu de la Terre dans l'Univers.

Moi cela ne m'étonne pas parce qu'on m'a dit que la lumière était une onde électromagnétique



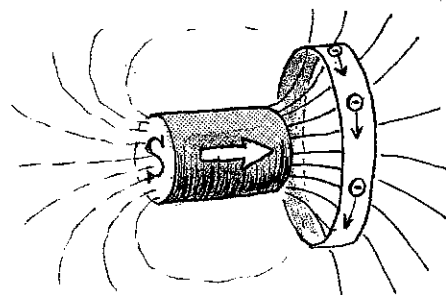
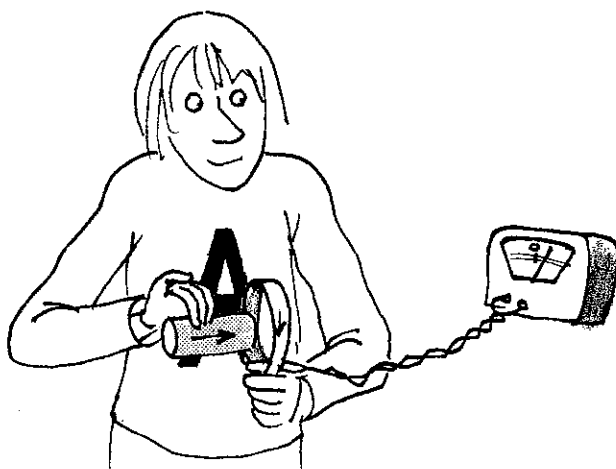
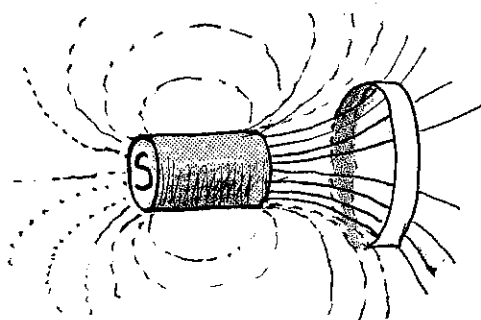
(\*) Michelson, physicien américain. Prix Nobel 1907.



# L'INDUCTION

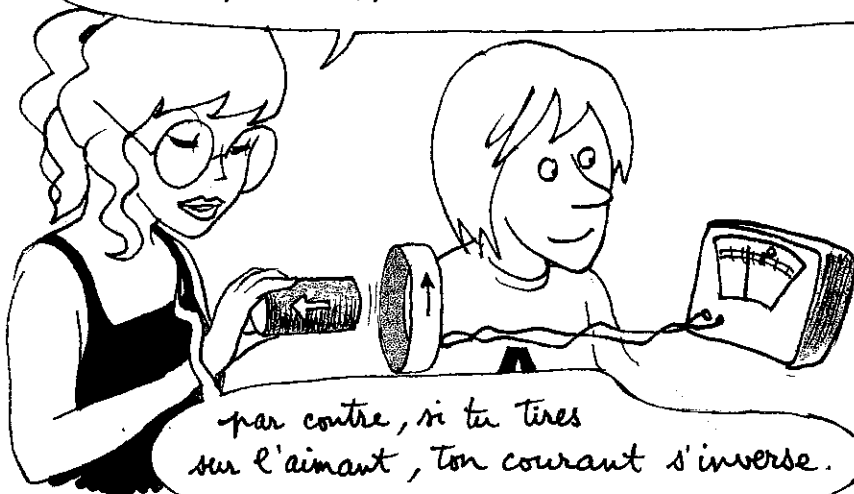


Regarde. Anselme amis cette spire de cuivre face à cet aimant permanent. Un certain nombre de lignes de force passent à l'intérieur et les autres à l'extérieur

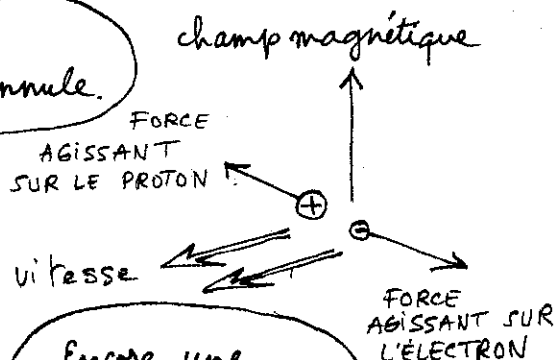


Maintenant il approche l'aimant de la spire, c'est-à-dire qu'il déplace en bloc le faisceau des lignes de force. Celles-ci coupent le métal de la spire et il en résulte une force électromagnétique qui, agissant sur les électrons, se traduit par un courant **INDUIT**.

Si ton aimant et ta spire sont immobiles l'un par rapport à l'autre, le courant s'annule.



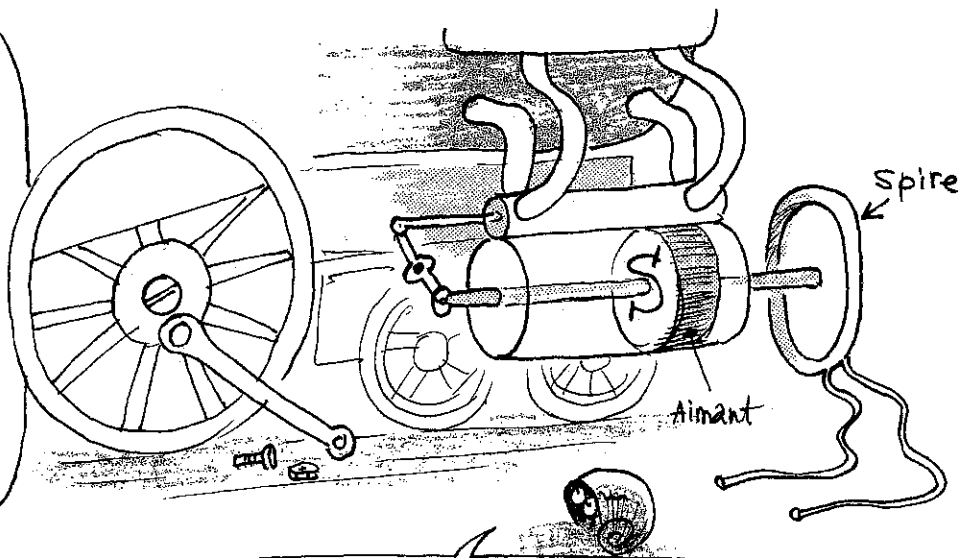
par contre, si tu tires sur l'aimant, ton courant s'inverse.



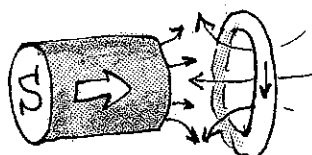
Encore une n+unième application de cette unique loi de LAPLACE.



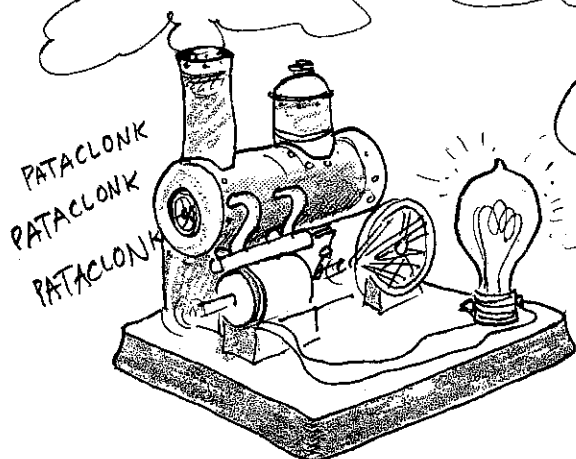
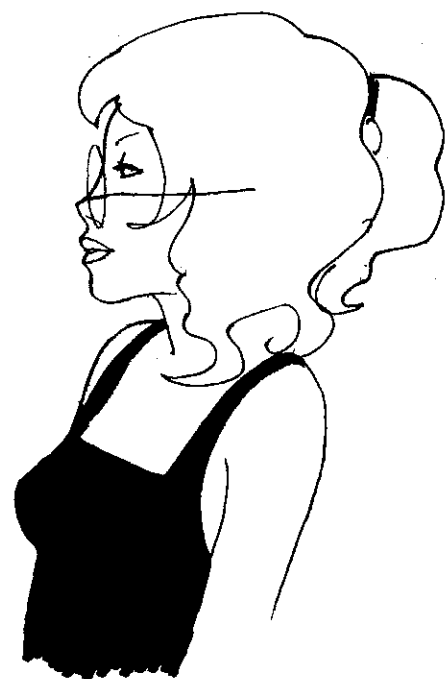
Regarde, Térésias, j'ai modifié cette machine à vapeur en remplaçant le piston par un aimant, qui va ainsi faire un mouvement de va-et-vient, et créer dans la spire un **COURANT ALTERNATIF**



Si le piston glisse sans frottement, nous aurons trouvé un moyen de produire gratuitement de l'énergie électrique, si on excepte, bien sûr une petite perte par effet Joule dans la spire.



Tu oublies que ce passage de courant va créer son propre champ magnétique, qui va s'opposer au mouvement du piston aimant (**LOI DE LENZ**). Il faudra donc fournir un **TRAVAIL** pour produire cette énergie

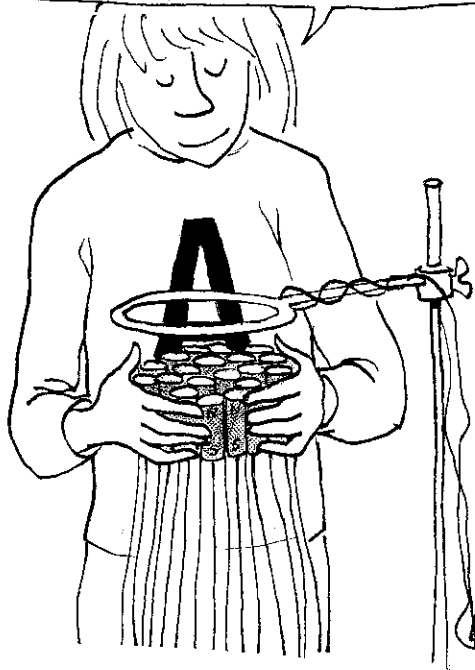


Voici donc une première génératrice de courant alternatif.

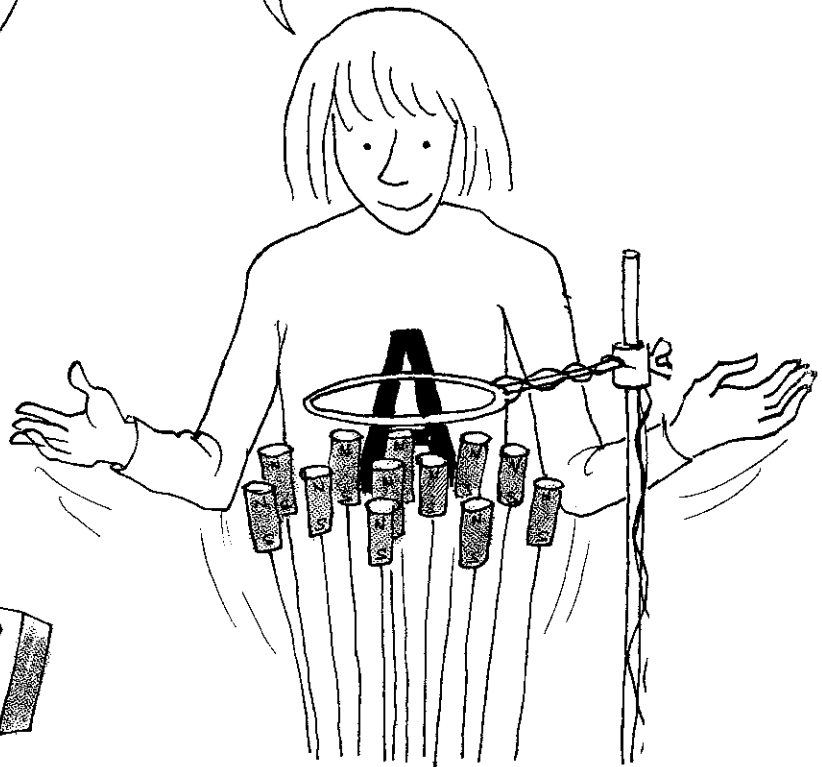




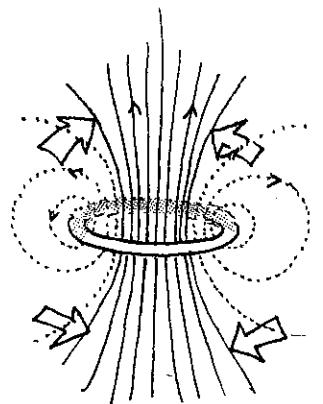
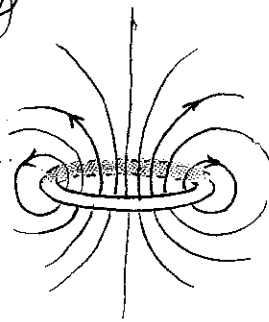
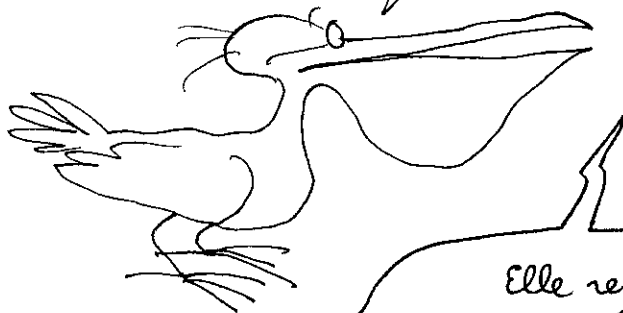
Puisqu'on produit du courant alternatif en agitant un ou plusieurs aimants devant une spire, que dis-tu de mon GÉNÉRATEUR-FAGOT ? J'ai fixé des aimants sur des tiges flexibles...



...quand je les lâche, ces tiges s'écartent et se rassemblent alternativement, et cela produit un courant alternatif dans la spire.

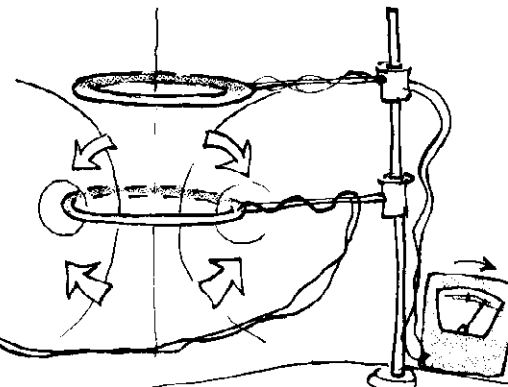


Bon. Cette machine convertit en énergie électrique l'énergie emmagasinée dans les tiges, et alors ?



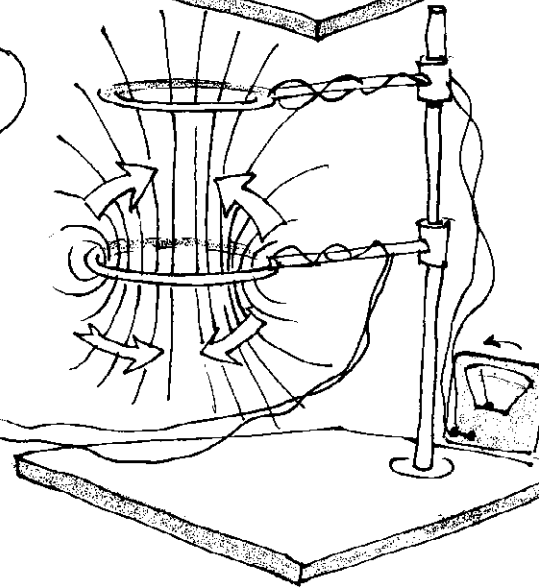
Elle reproduit ce qui se passe quand on accroît le courant qui passe dans une spire. Tout se passe comme si de nouvelles lignes de force étaient créées à la surface de celle-ci, "comprimant" les anciennes, comme un fagot.

Et vice versa. Quand on réduit le courant, la spire "avale" les lignes de champ les unes après les autres, et le "fagot" se desserre.



Hop!

Ce qui explique pourquoi une spire parcourue par un courant alternatif peut transmettre à distance de l'énergie à une autre spire.



# CHAUFFAGE HF

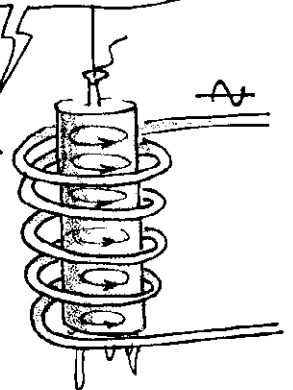
Quel intérêt ?

C'est un système de chauffage très efficace. On peut se rôtir complètement un doigt muni d'un anneau, en le mettant dans un espace où règne un champ magnétique variable.

On peut faire fondre des lingots.

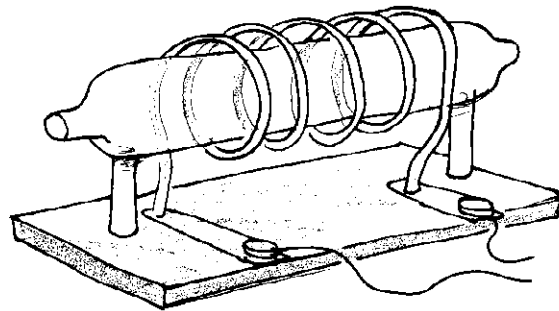
solénoïde

on peut aussi chauffer des conducteurs dans la masse. Il se crée alors une infinité de boucles de courant.





on peut aussi chauffer  
un gaz à l'aide d'un  
bobinage parcouru par un  
courant à haute fréquence...



Bref on peut chauffer,  
cuire tout ce qui est  
suffisamment conducteur  
de l'électricité...

qu'y a-t-il de si  
mystérieux dans cette  
grande boîte vide ?

... y compris  
des escargots !

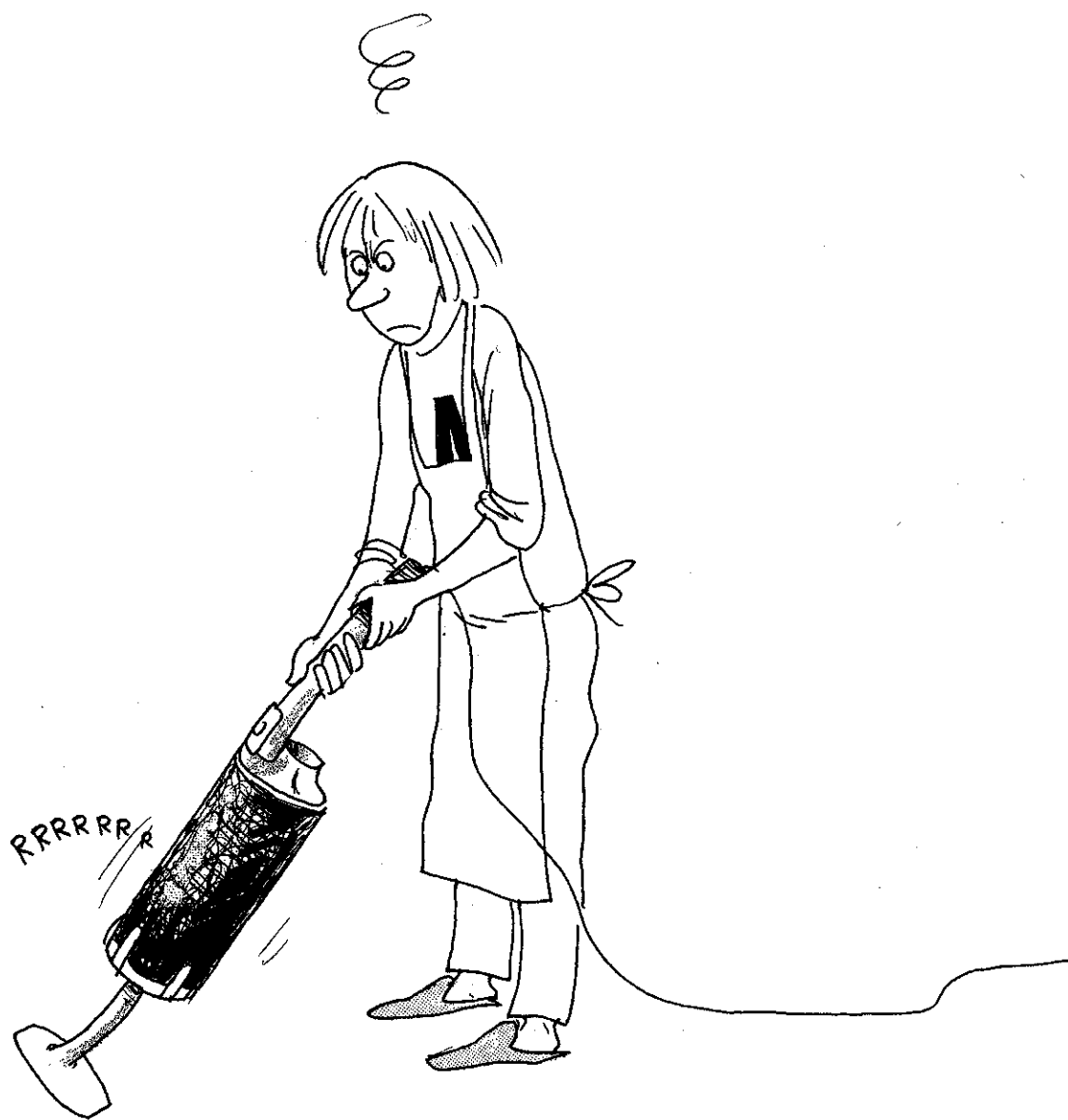
# ÉPILOGUE

Ce voyage à travers l'électromagnétisme  
a été tout à fait passionnant.

Oui, qui aurait cru qu'une simple  
maison puisse receler des problèmes  
scientifiques aussi pointus ?

J'ai une autre expérience à  
vous proposer, qui touche à la fois  
à l'électromagnétisme et à la  
mécanique des fluides...

Ah bon, qu'est-ce  
que c'est ?



**FiN**