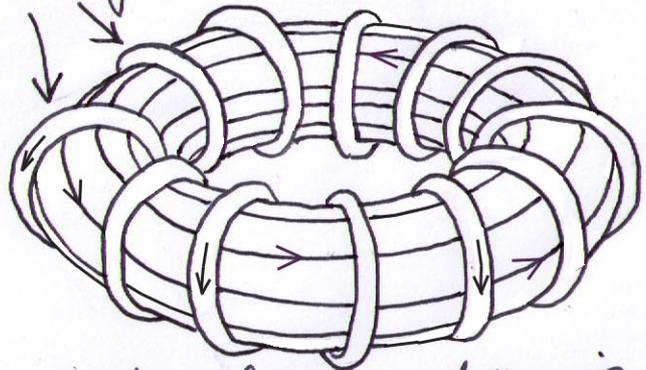


boule polystyrène A



fil de fer en fonce

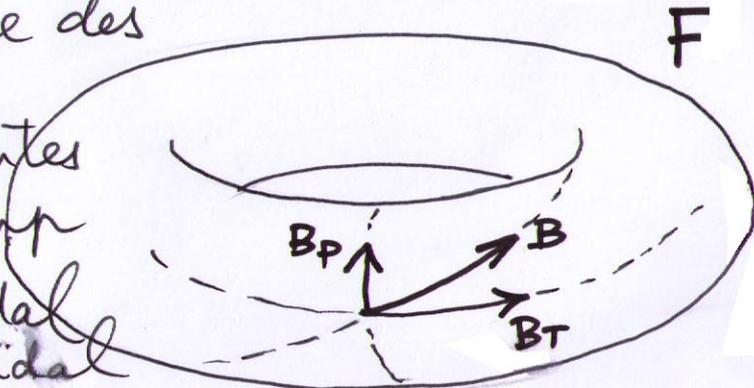
cordons nylon collei



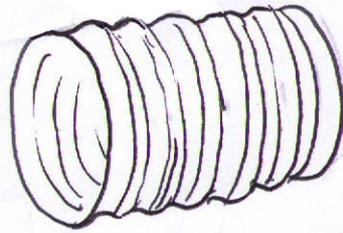
lignes de champ dessinée au marker noir, plus resserrée à l'intérieur

repérage des deux composantes du champ

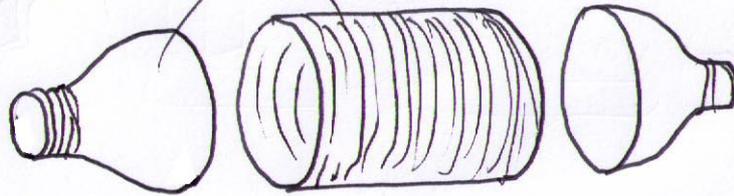
BT: toroidal
Bp: poloidal



section bouteille B



bouteille plastique

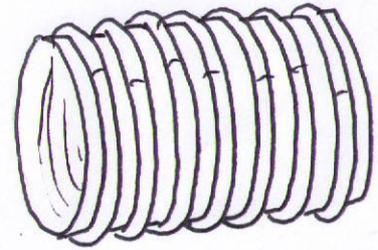


cordons nylon



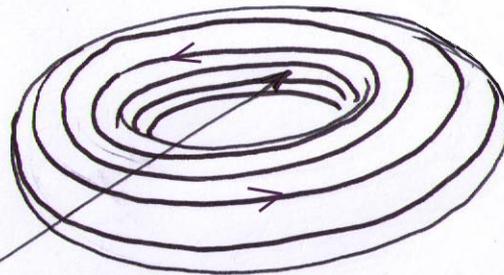
brquet

"solenóide"

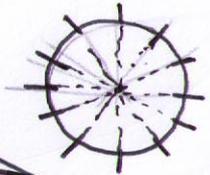
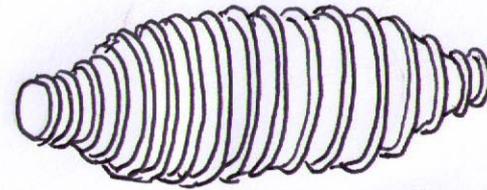


2

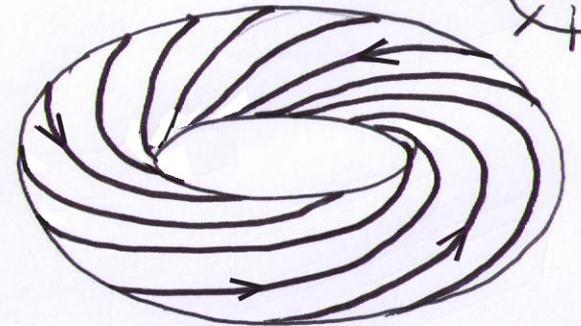
D



C

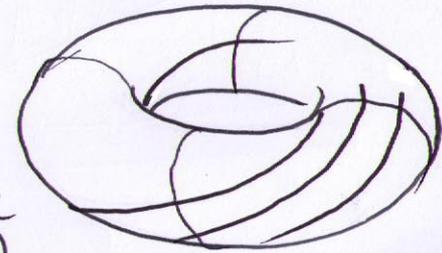


"bouteille magnétique"



E

lignes de champ spirales, tracées au marker (repérage sur des cercles)



LE JET

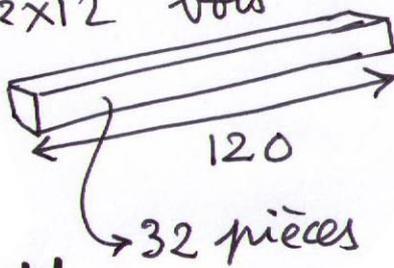
(ou Tore Supra)

tringle bois

12x12 bois

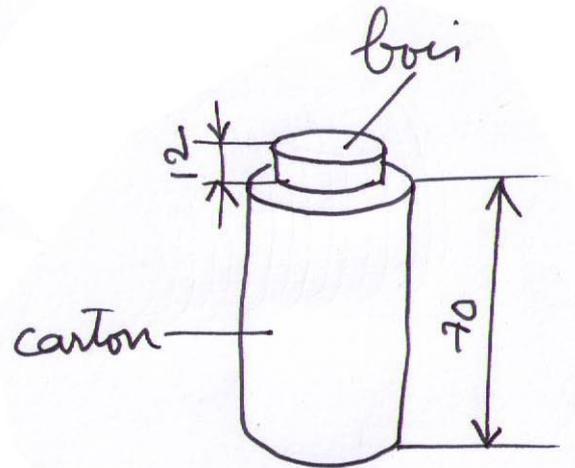
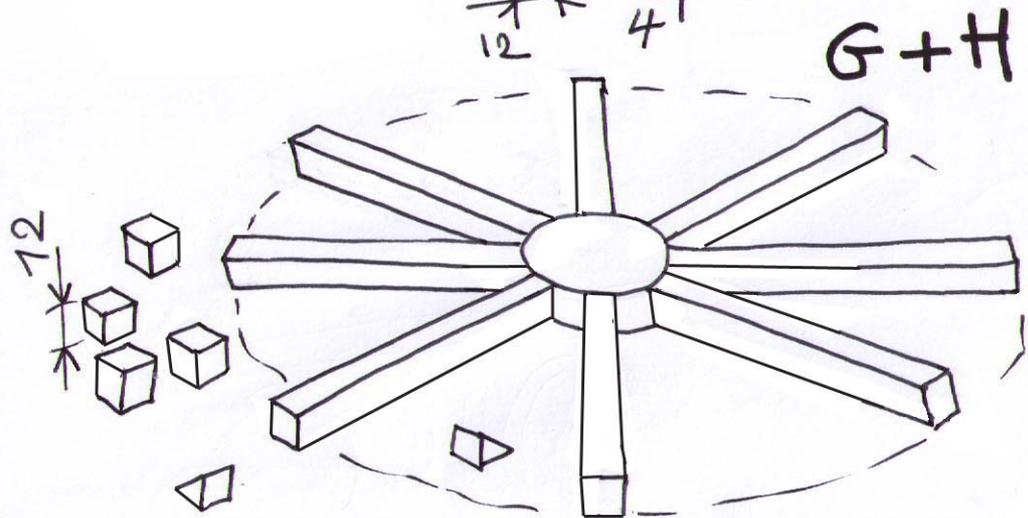


2 pièces
4

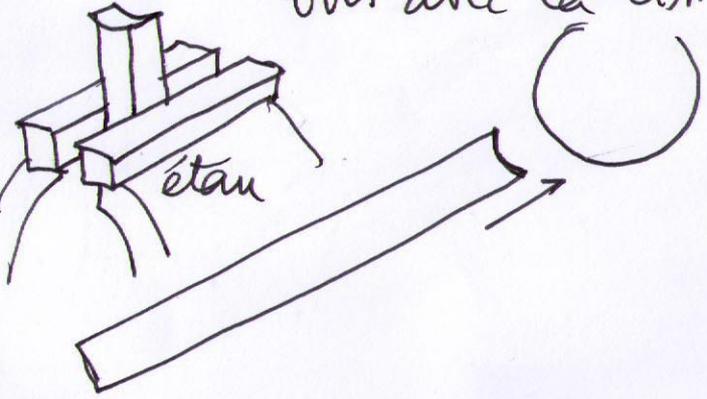
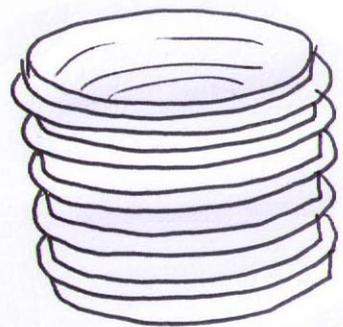
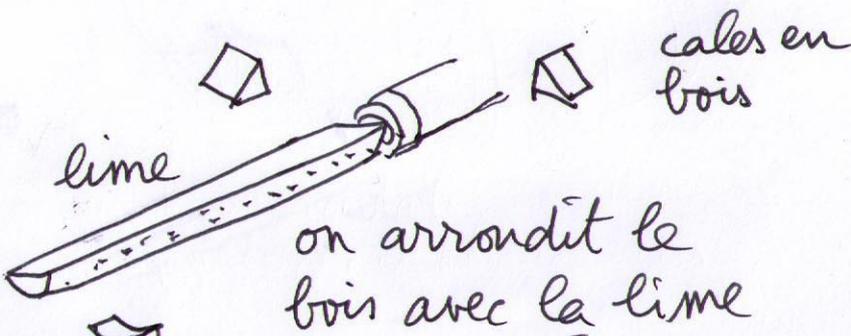


32 pièces

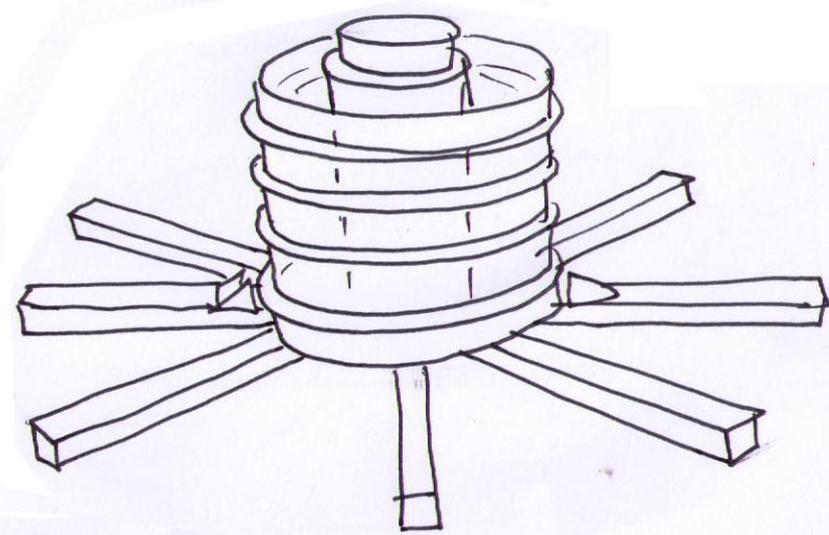
embase du noyau de l'électroaimant (3)



axe "noyau de fer doux"

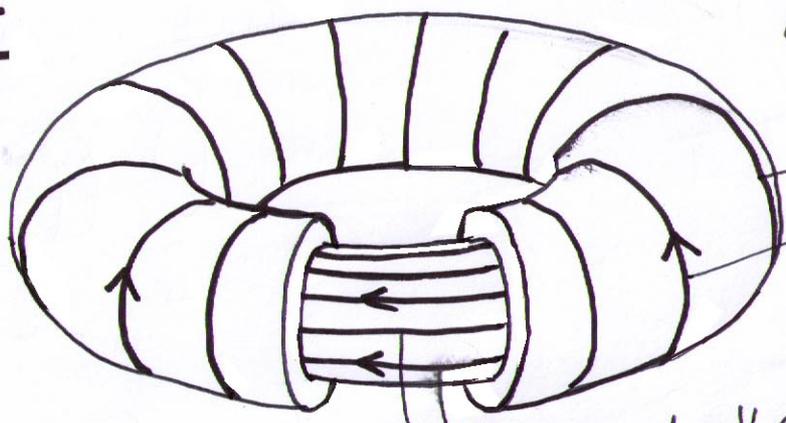


"solénoïde inducteur"
(cordon nylon sur bouteille plastique transparente)



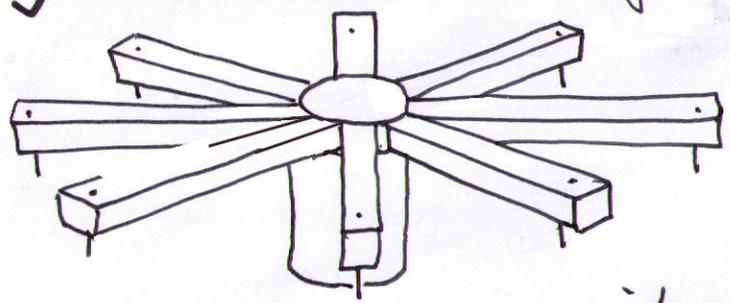
I

dessin composante du champ poloidal, obtenu par induction (au marker noir)



ligne du "courant plasma, au marker rouge"

J



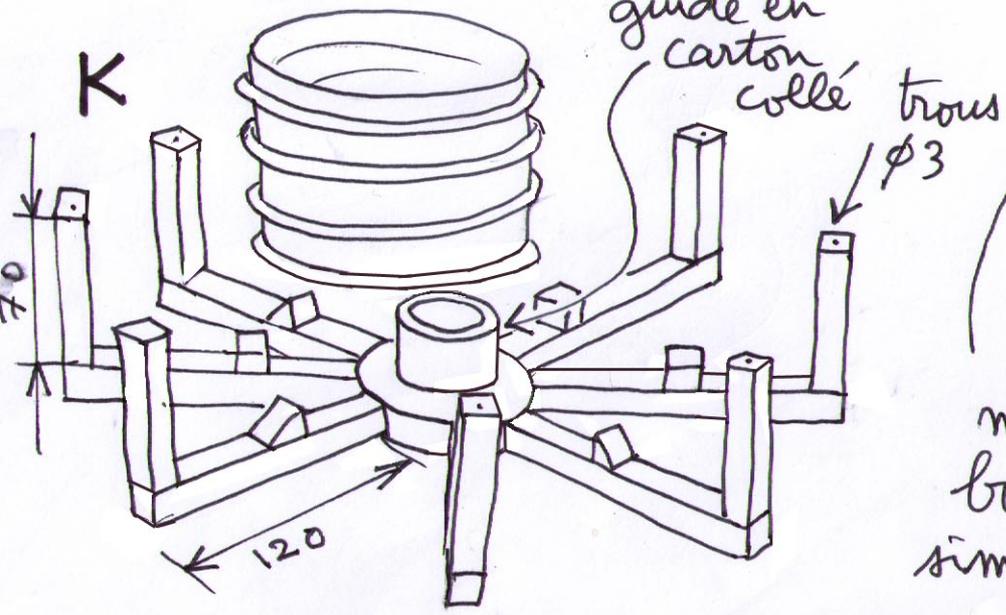
clous (pions de centrage) Ø2

bois

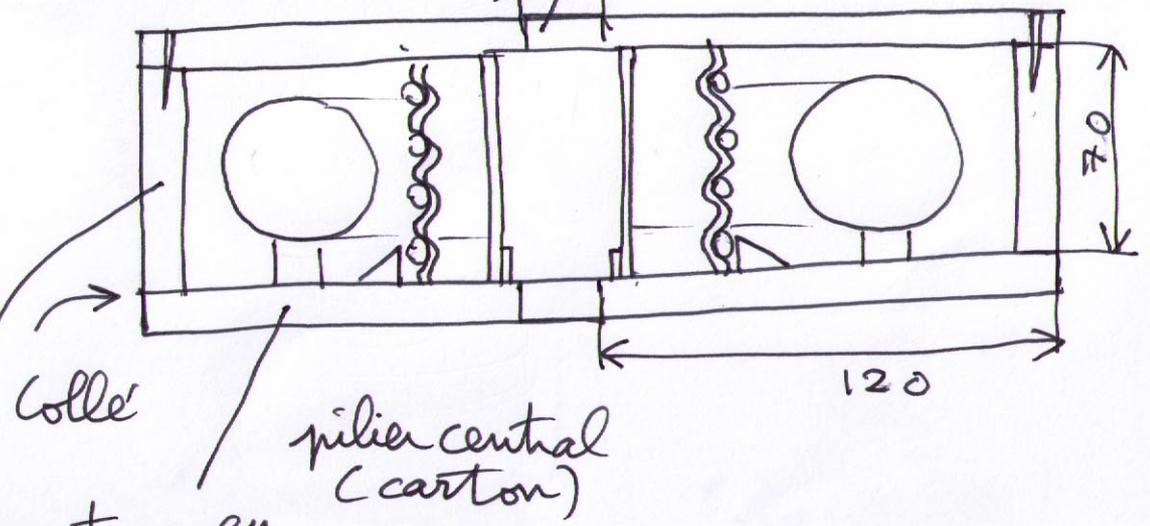
45

L

K



guide en carton collé
trous Ø3



collé

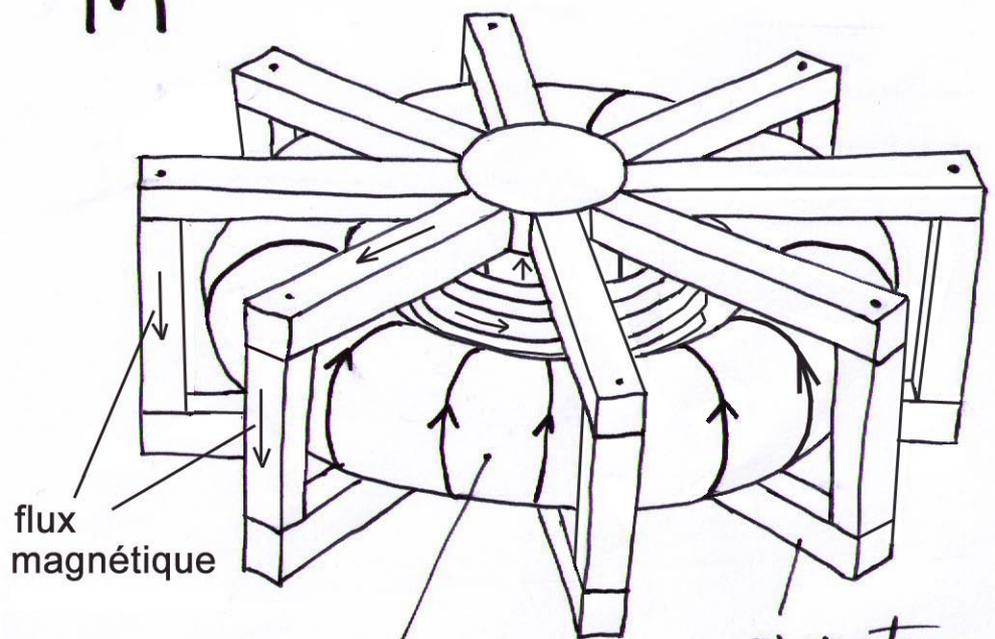
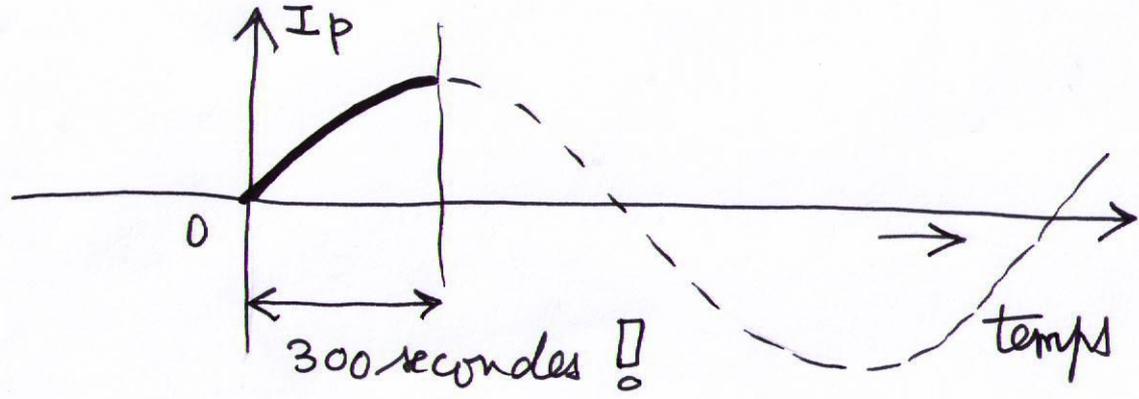
pilier central (carton)

montage en bois (dessus amovible) simulant la carcasse de fer doux

M

5

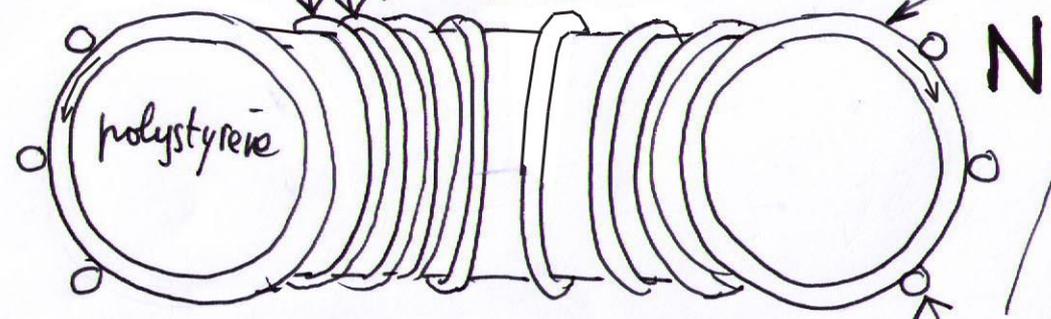
le "transfo" crant le courant plasma I_p



flux magnétique

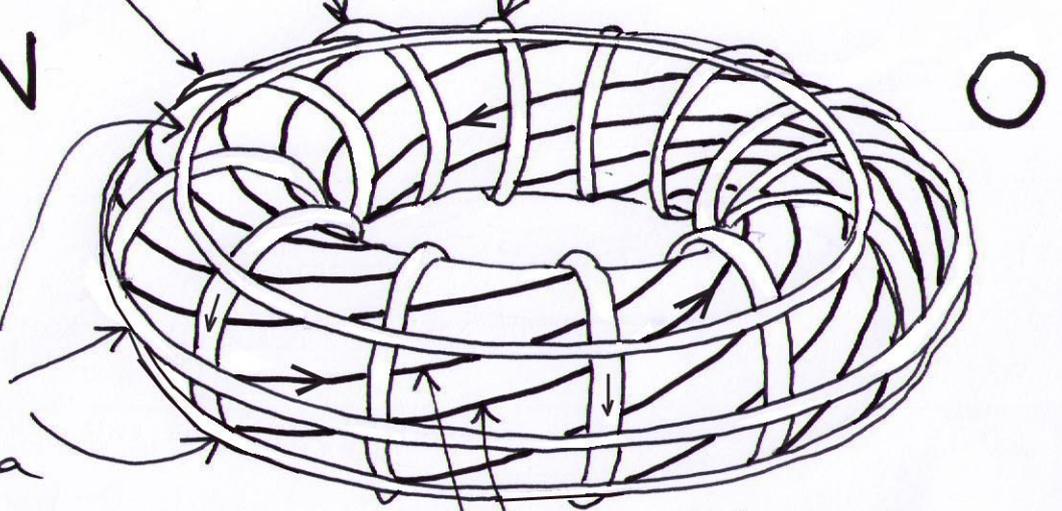
chambre toroidale
cordon nylon $\phi 7$

armature en "fer doux"



cordon nylon $\phi 4$ simulation les bobines de controle du tore de plasma

cordons nylon $\phi 7$ simulant les bobines supraconductrices



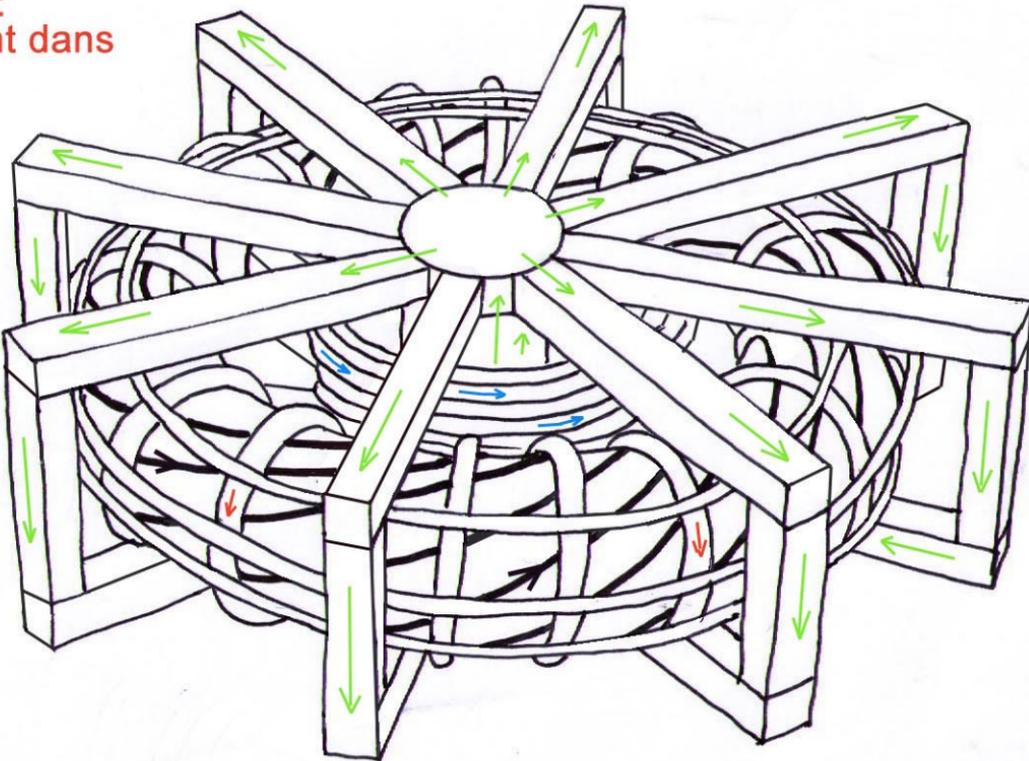
lignes de champ magnétique dessinées au marker

flèches vertes : flux magnétique dans l'armature en fer doux

flèches rouges :
courant constant dans
les bobines
créant le
champ toroïdal

flèches noires
champ
magnétique
dans le plasma

flèches bleues
courant
croissant dans
le solénoïde
inducteur

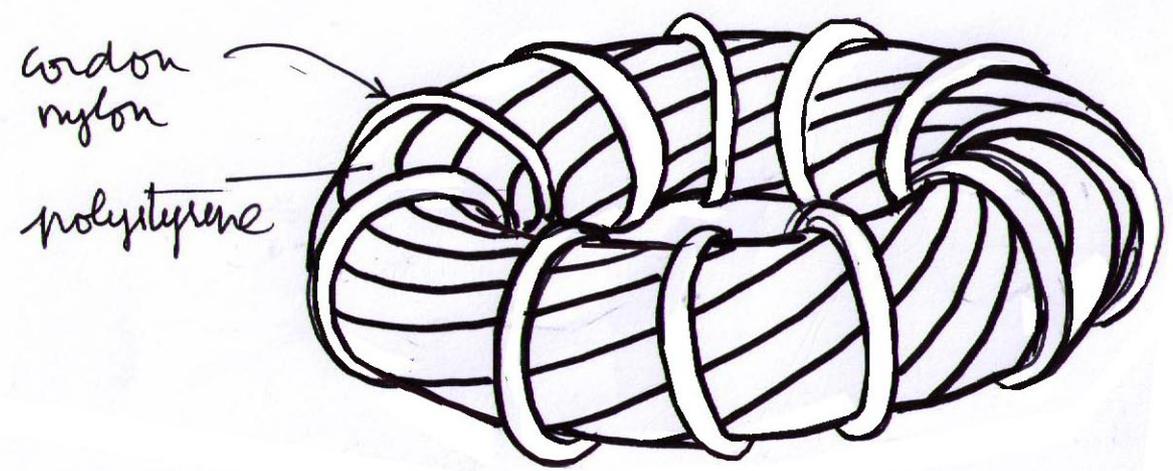


6

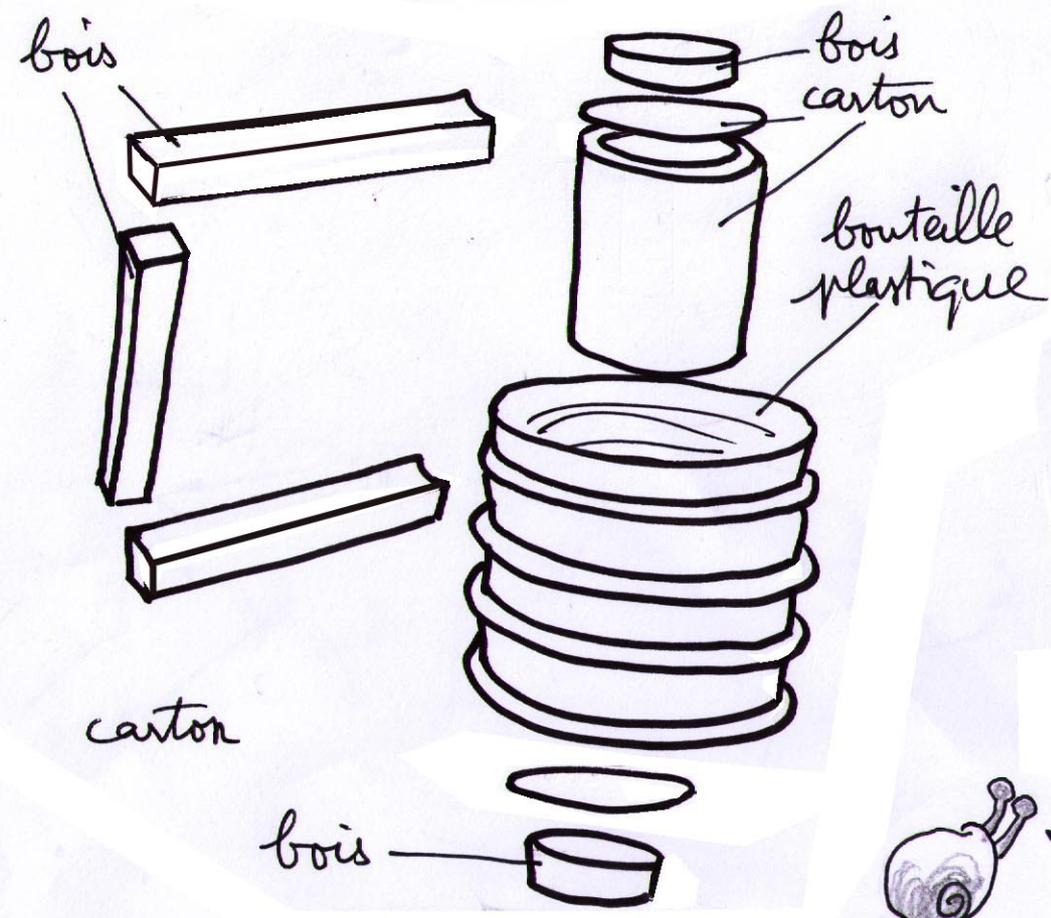
P

la maquette du Tokmak, finalisée

Q



plus qu'à rajouter les injecteurs de neutres, les antennes HF, les pompes, le divertor, les systèmes de mesures les injecteurs de glaçons



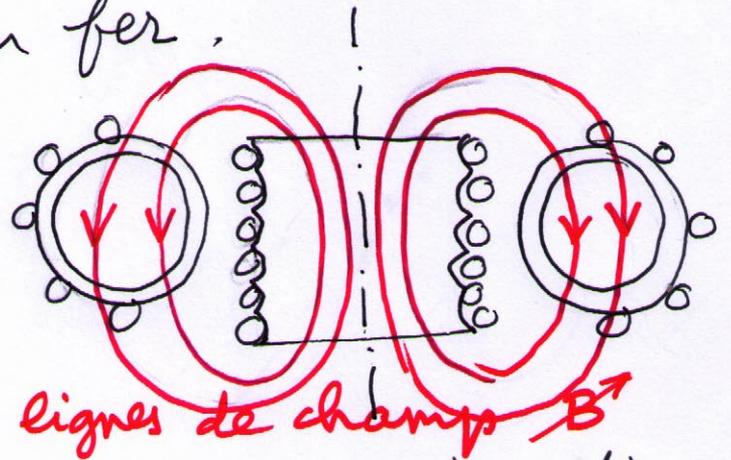
le truc simple, quoi...



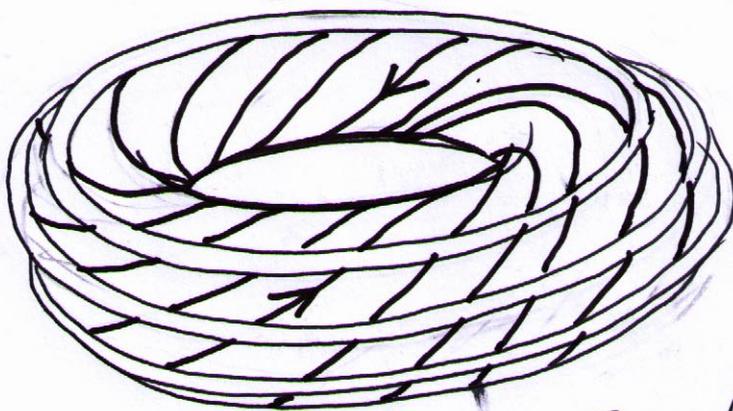
Le tokamak ITER

8

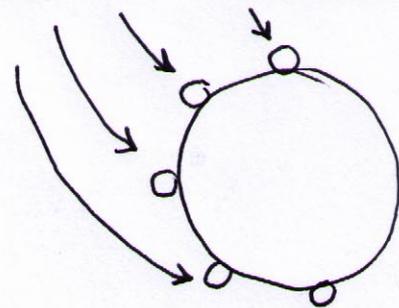
Plus d'armature en fer,
le champ magnétique
croisant, créé par
un solénoïde central,
supraconducteur
créé le courant plasma I_p par induction



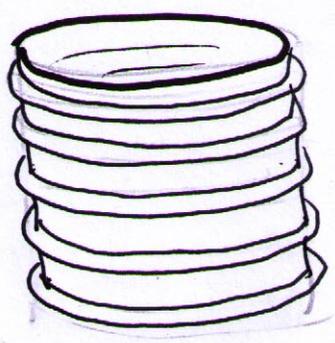
on dessine les
lignes de champ
spirales sur
le tor de
polystyrène



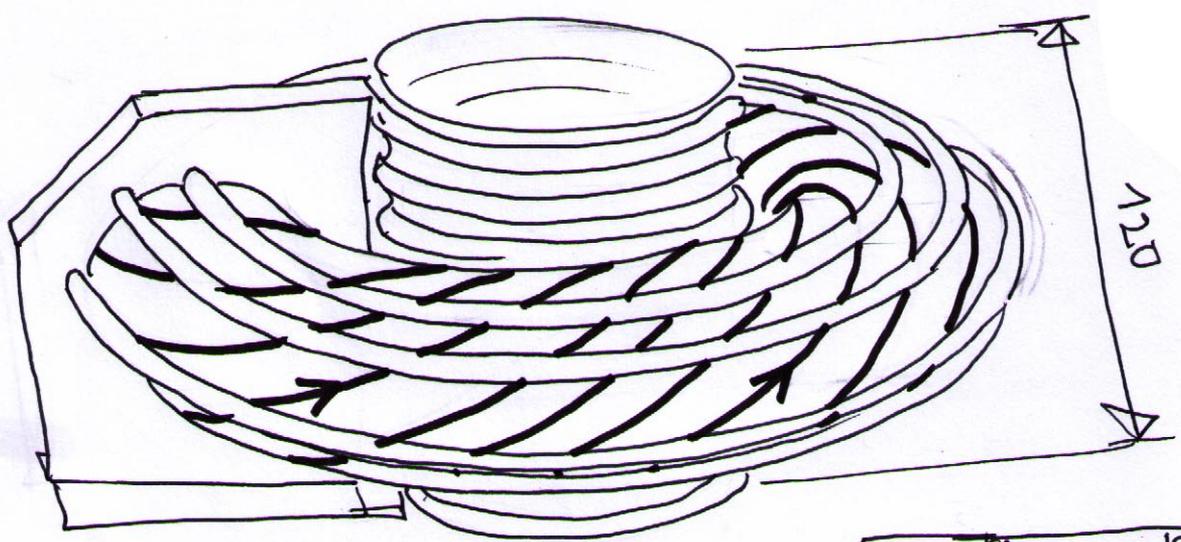
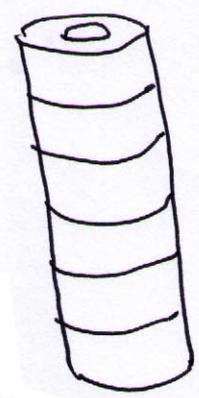
bobines de contrôle



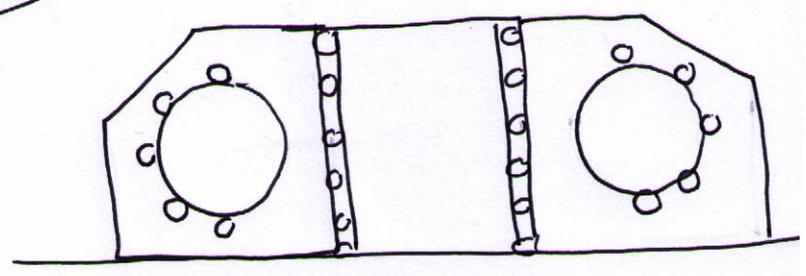
on colle dessus 5
boule de terre nylon
de 7 mm (en fait il y en a 6)



on crée la bobine inductive sur un tronçon de bouteille plastique (en fait cette structure est plus étroite =)

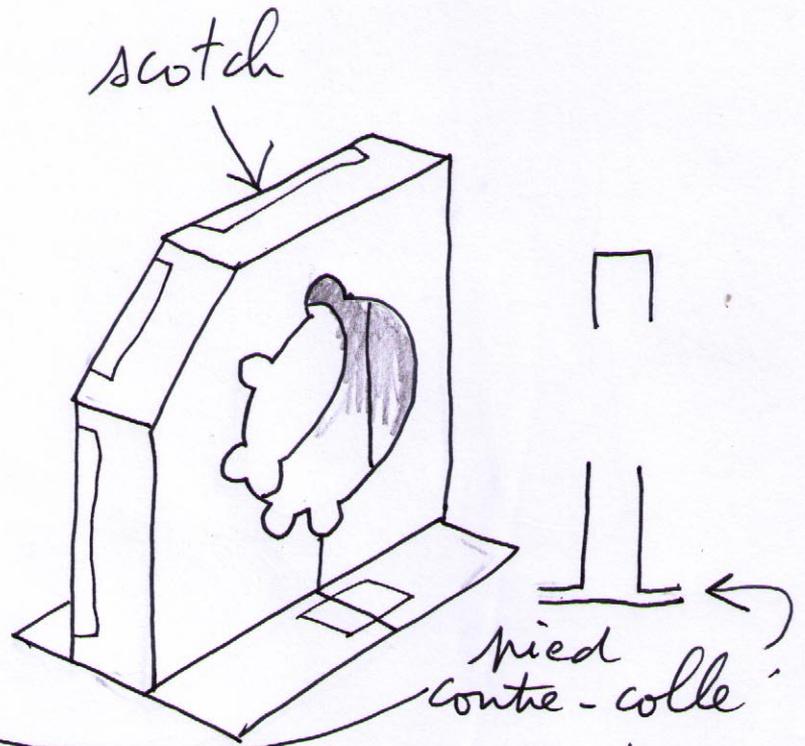
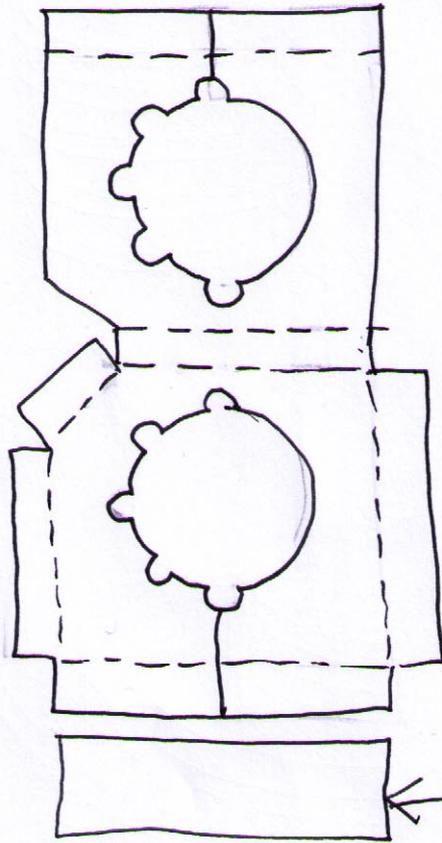


on vient adapter sur le tore 12



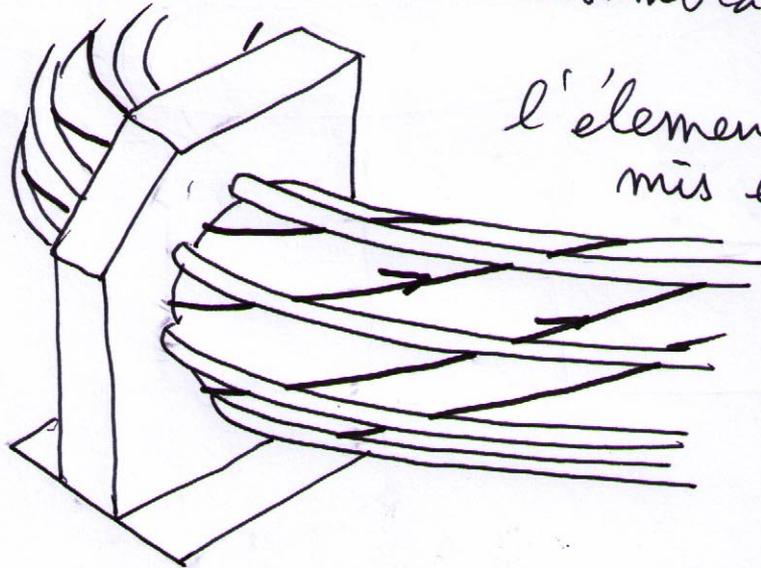
éléments contenant les spires supraconductrices (qu'on supposera cachées par ces structures de renfort, reposant sur des "pieds").

en pointillé = les plis



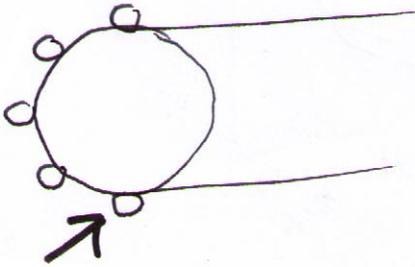
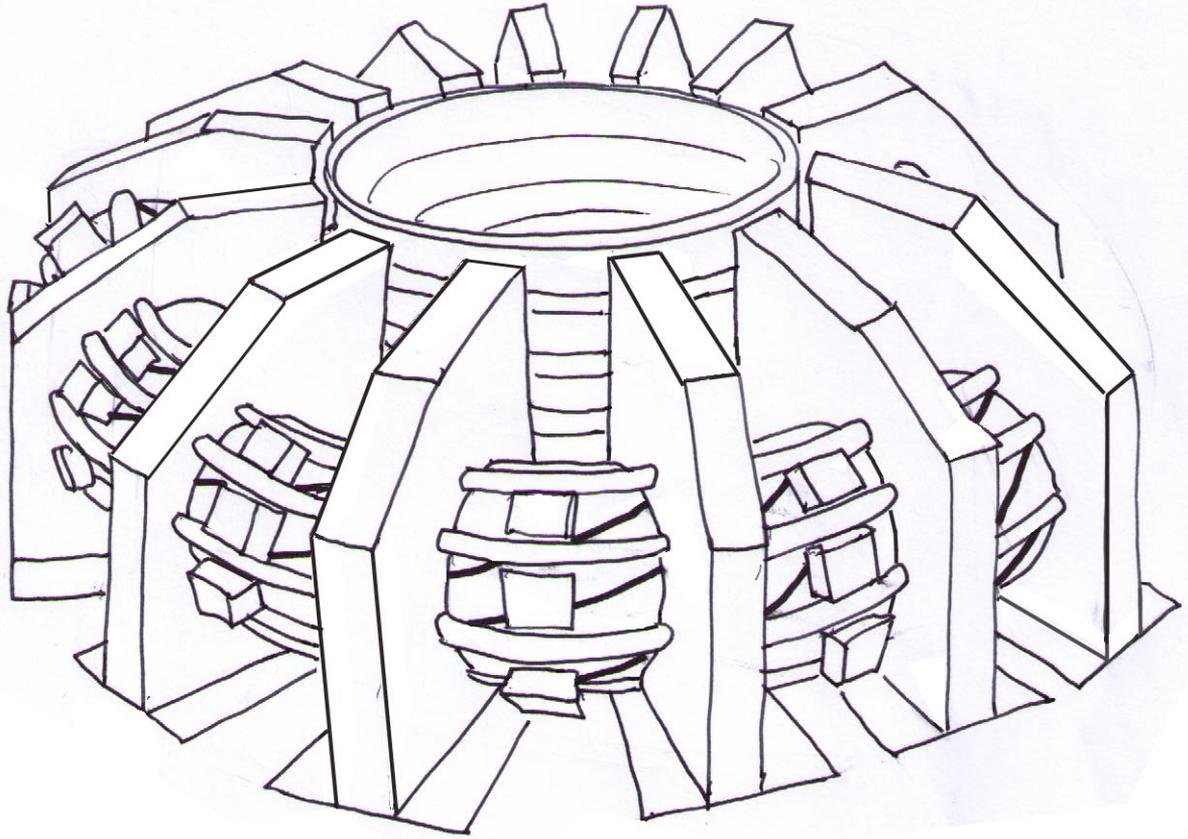
assemblage au scotch

l'élément mis en place

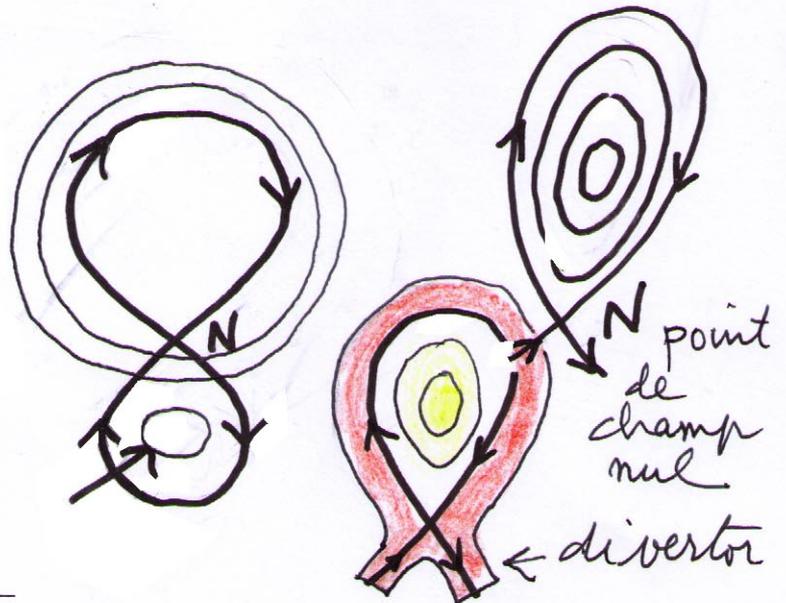


on pourra ajouter des tronçons de bois (des cubes de 12x12x12) figurant les entrées des systèmes de chauffage additionnel

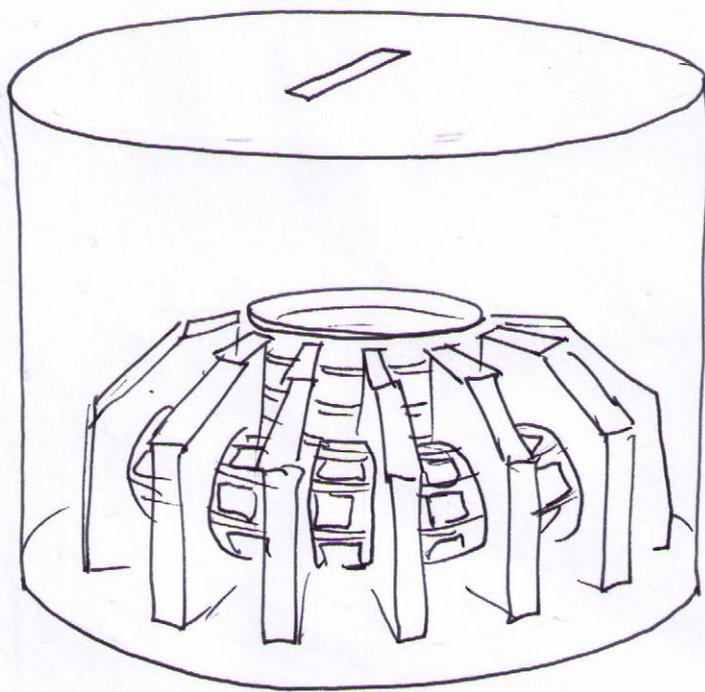
la maquette finalisée



le bobinage inférieur permet de créer une ligne de champ nul et une séparatrice, la partie rosée conduisant au "divertor"



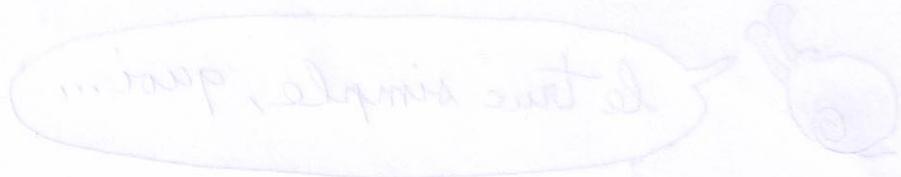
vous pourrez ajouter
une cloche en rhodoïd transparent



de la
ploutophysique



une fente, à la partie supérieure
permet d'introduire les billet de
100 euros



Comment construire la maquette du jouet le plus cher du monde

(ITER est un tokamak)

Planche 1 vous avez tout le matériel que vous devez vous procurer. Les tore en polystyrène se trouvent dans les magasins de fourniture pour artistes (ils servent à faire des guirlandes). Vous pourrez trouver aussi des sphères en polystyrène.

Planche 2

A : Avec du fil de fer (lignes rouges) vous pourrez figurer les lignes du champ magnétique terrestre. En montrant comment elles se resserrent au voisinage des pôles vous pourrez montrer comment cette « magnétosphère terrestre » constitue une structure de piégeage naturelle des particules chargées (émises par le Soleil : le « vent solaire »).

B : En découpant une portion cylindrique d'une bouteille d'eau minérale en plastique transparent, porteuse de rainures, vous pourrez loger dans celles-ci des cordons de tresse de nylon de 7 mm de diamètre, en brûlant les deux bouts à l'aide du briquet, pour éviter qu'elles s'effilochent. Ce solénoïde permet de concentrer un plasma loin de ses spires. Hélas ce champ s'épanouit aux orifices, ce qui facilite l'évasion du plasma.

C : Les physiciens ont alors eu l'idée de réaliser des « bouteilles magnétique » (réalisée avec des fragments des bouteilles d'eau minérale). Mais le confinement du plasma ne s'avéra pas suffisant

D : On eut alors l'idée de « refermer le solénoïde sur lui-même », c'est à dire de tenter d'emprisonner le plasma dans un tore, ceinturé de bobines, créant un champ magnétique disposé selon une famille de cercles ayant l'axe de la chambre comme axe commun. Mais, ce faisant, les bobines sont plus resserrées à l'intérieur, ce qui est encore plus net dans les véritables tokamaks, dont le « petit rayon » a est encore plus faible.

Cette croissance du champ magnétique dans la direction radiale était incompatible avec un bon confinement du plasma. Il fallait « une cuillère » pour agiter ce mélange électrons-ions, lui donner l'homogénéité requise.

C'est là qu'on s'est souvenu que dans un milieu très raréfié les particules chargées spiralent autour des lignes de champ magnétiques, lesquelles jouent vis à vis d'elles le rôle de rails de guidage (c'est ce qui se passe autour de la Terre, où les particules « piégées » spiralent autour des lignes du champ terrestre).

E : Les Russes se dirent alors : donnons aux lignes de force du champ magnétique la forme de spirales s'enroulant sur dans le la chambre torique, cette géométrie nous fournira l'homogénéité désirée. Cette solution, inventée par Andréï Sakharov, resta secrète tant qu'on s'imaginait que ces systèmes pouvaient avoir des applications militaires. Quand

cette idée parut vaine, ces recherches furent déclassifiées, en 1958 et les Occidentaux découvrirent les « tokamaks » russes.

F : Pour créer cette géométrie magnétique il faut que le champ ait deux composantes : B_T , le « champ toroïdal » et B_P , le « champ poloïdal ». Les bobines présentées en **D** créent le champ toroïdal (attention, la colle cellulosique dissout le polystyrène).

Planche 3 :

Procurez-vous les éléments indiqués : disque de bois, baguettes de section 12 x 12 mm , portion de bouteille d'eau minérale. Il vous faut aussi un cylindre de carton. Dans les figure **G** et **H** vous voyez comment coller, en étoile, huit baguettes de 120 mm de longueur. Vous pouvez, à l'aide d'une scie à bois, ménager des extrémités concaves pour que celles-ci épousent plus facilement le contour du disque en bois (de 12 mm d'épaisseur), et pour les coller dessus plus facilement. Constituez deux éléments de ce genre. Vous allez constituer un « solénoïde » autour d'un fragment de bouteille d'eau minérale, cerclé de « bobines » faites à l'aide de cordon nylon de 7 mm de diamètre.

Planche 4 :

La figure **K** vous montre cette même structure étoilée, munie d'un cylindre de centrage, sur lequel vous pourrez enfiler le tube de carton, qui représentera l'axe du « noyau de fer » de cet « électro-aimant » (ce tokamak est construit à l'image du JET, ou de Tore-Supra, pas d'ITER). Placez aussi des cales

pour bien centrer le « solénoïde ». En **L** une coupe est dessinée.

Il est intéressant de faire en sorte que cette maquette soit démontable, c'est à dire que l'étoile de la figure **J** puisse venir s'adapter sur les montants verticaux, de 70 mm, que vous aurez collé sur les huit branches de l'étoile inférieure.

Des clous de 2 mm de diamètre vous serviront de « pions de centrage ». Pour arranger le tout et permettre à cette « cage toroïdale » de bien s'ajuster, Fixez les branches de l'étoile sur les montants correspondants avec du ruban adhésif, puis utilisez une perceuse à colonne pour percer bien verticalement en 2 mm de diamètre.

Ceci fait, enlevez le ruban adhésif. Agrandissez alors les trous ménagés dans les montants en 3 mm de diamètre, de manière à ce que les clous s'y engagent facilement.

Enfoncez les clous dans les trous, de manière à ce qu'il dépassent d'un cm en pénétrant dans les montants verticaux. Puis enlevez la partie du clou qui dépasse avec une pince coupante. Disposez des petits cubes en bois (quatre) sur lesquels votre chambre torique pourra venir prendre appui.

Le dessin **I** représente une chambre toroïdale dépourvue de ses bobines, créant le « champ toroïdal » de tout à l'heure. Découpez le polystyrène comme indiqué, pour « faire apparaître le plasma » dans la « chambre torique ».

Avec le marker noir, vous dessinerez les lignes du « champ magnétique toroïdal », et avec un marker rouge les lignes du

« courant plasma », éventuellement sur un fond bleu ciel déposé à la gouache.

Planche 5

Figure **M**, le tout, assemblé. Cette chambre toroïdale, dépourvue de ses bobines, est alors remplie d'un mélange d'hydrogène lourd, avec une pression de remplissage de quelques millièmes de millimètre de mercure (quelques millionièmes d'atmosphère). Ce gaz est ainsi très raréfié.

Les opérateurs créent alors un champ magnétique à l'aide du solénoïde central, du solénoïde « inducteur ». Ce champ va monter. Dans ce type de tokamak il se boucle en empruntant les chemins indiqués par les pièces de bois carrées (flèches vertes dans la figure 6), qui dans un véritable tokamak seront des éléments en fer doux. Ce système de noyau de fer doux se boucle sur lui-même par l'intermédiaire d'un pilier central, lui aussi en fer doux.

Tout ceci a tout d'un transformateur. Le bobinage situé près de l'axe est le « primaire ». La variation du champ magnétique crée dans la chambre torique un courant induit, qui se boucle sur lui-même. C'est le « courant plasma I_p ».

Il existe des lampes dites « lampes à induction » qui fonctionnent sur ce principe. On alimente le solénoïde central avec du 50 périodes. Ceci crée dans une chambre transparente, de forme torique, un courant induit circulaire, dont la direction se renverse à chaque cycle.

On obtient ainsi un « tube au néon dépourvu d'électrodes ».

Mais dans un tokamak ça n'est pas ça qui intéresse les scientifiques. Ils veulent un courant plasma constant et intense. Ce courant va également chauffer le gaz contenu dans la chambre par effet Joule.

La variation du courant circulant dans le solénoïde central, entourant l'axe de la machine, crée un courant qui va croissant au fil du temps. Courant qui crée un champ magnétique également croissant. Cette évolution est programmée par le « pilote » du Tokamak.

On crée dans la chambre des électrons libres par action « d'un peu de HF », puis ceux-ci sont accélérés par ce faible champ et peuvent acquérir de grandes énergies sous l'effet de celui-ci. Une énergie dépassant l'énergie d'ionisation de l'hydrogène. Ces électrons accélérés peuvent ainsi arracher d'autres électrons liés aux atomes, qui seront accélérés à leur tour.

On appelle ce phénomène une *avalanche électronique*. C'est exactement ce qui se passe dans un tube au néon, à la différence près que ce champ accélérateur est créé par la différence de potentiel appliquée entre les deux électrodes, situées aux extrémités du tube.

Très vite, l'hydrogène qui est dans la chambre du tokamak se trouve totalement ionisé. Ça n'est plus qu'un mélange d'électrons libres et de noyaux chargés positivement. Le champ électrique induit accélère les électrons et leur communique ainsi de l'énergie cinétique.

Les collisions entre les électrons et les ions représentent l'effet Joule. Ainsi les électrons rétrocedent cette énergie au gaz d'ions, qui monte en température.

Mais, au passage, il se produit un autre phénomène. Dans un milieu aussi raréfié, le libre parcours moyen électronique est important, et le long de celui-ci les électrons peuvent gagner en vitesse. A partir d'un certain seuil, ils passent si vite à côté des ions qu'ils n'ont plus le temps de communiquer à ceux-ci de l'énergie cinétique.

Un théoricien dirait que la « section efficace de collision électron-ions » diminue au fur et à mesure que la vitesse des électrons s'accroît. Elle varie comme l'inverse de la puissance quatrième de la vitesse des électrons.

Quand la vitesse des électrons atteint 15.000 km/s l'interaction entre les électrons et les ions devient infime. Le gaz d'électrons, dont la température est alors voisine de celle du gaz d'ions, est alors de 10 millions de degrés. Un état de régime s'établit. Dans ITER, le courant qui sera ainsi créé sera de 15 millions d'ampères. L'impédance du conducteur dans lequel circule ce courant sera de l'ordre du millionième d'Ohm.

Revenons à la construction de notre maquette. Ceci vous amène à remplacer, dans votre « cage inductrice », la chambre toroïdale nue par la chambre équipée des bobines créant le champ toroïdal. Vous obtiendrez alors le dispositif **O**.

Il vous faudra prendre un nouveau tore en polystyrène, dessiner les lignes de champ magnétique dessus, s'enroulant bien régulièrement, puis coller les boucles de cordon de nylon

de 7 mm de diamètre (bruler les deux bouts avec le briquer, et procédez rapidement, car la colle cellulosique dissout le polystyrène).

Ajoutez trois spires circulaires, en cordon de 4 mm de diamètre, qui figureront les systèmes magnétiques asservis visant à contrôler la position du plasma dans la chambre.

Planche 6

Figure P, votre tokamak **JET** (ou **Tore Supra**) achevé. J'espère que vous avez compris les fonctions de tous ses constituants.

Le fait que le courant plasma I_p ne puisse être entretenu que par la (relativement lente) montée du champ magnétique créé par le bobinage central, et le fait que ce champ ne puisse monter à l'infini fait que ce système ne peut donner que des temps de fonctionnement limités, des « tirs ».

Des solutions ont été envisagées pour permettre à ce courant de perdurer, en accélérant les électrons de diverses manières, en particulier à l'aide de faisceaux d'onde. Ces systèmes portent un nom :

current drive

(système de génération non inductive du courant)

Avec un current drive qui fonctionnerait, un tokamak pourrait fonctionner en régime permanent. Mais on est loin de pouvoir assurer qu'il en sera ainsi. En règle générale, les tokamaks

sont des outils de recherche où on travaille en effectuant des « tirs ».

Pourquoi la pression de remplissage est-elle si faible ?

Parce que la pression est égale au produit

$$p = n k T$$

Où T est la température absolue, k une constante (la constante de Boltzmann, qui vaut $1,38 \cdot 10^{-23}$).

p est en pascals.

Si la fusion est visée, alors T est très important, de l'ordre de cent à deux cent millions de degrés.

La densité n (en atomes par mètre cube) dépend alors de la contre pression que pourra fournir le champ magnétique de confinement (le champ toroïdal est toujours plus élevé que le champ poloïdal).

Si les solénoïdes créant ce champ sont supraconducteurs, ils pourront donner 5,3 teslas, en régime permanent. Ceci a été testé sur Tore Supra. On installe ce courant le matin, et on arrête le soir. Mais on pourrait tout aussi bien le maintenir sans limitation de temps, à condition de refroidir les éléments avec de l'hélium liquide, à une température proche du zéro absolu. Auquel cas il y a supraconduction : ce courant circule avec un effet Joule nul.

Ce champ fournit alors une « pression magnétique » :

$$\frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{(B \text{ teslas})^2}{1,25 \cdot 10^{-6}} \text{ en pascals}$$

Soit, avec $B = 5,3$ teslas une pression magnétique

$$p_m = 2,25 \cdot 10^7 \text{ pascals}$$

Sachant qu'une atmosphère représente 10^5 pascals, cette pression magnétique représentera 224 atmosphères.

Est-ce à dire qu'on pourrait confiner, dans une telle enceinte, un plasma où régnerait une telle pression ?

La réponse est non. En tablant sur le dixième de cette valeur, la pression plasma sera de 22,4 atmosphères. Avec une température de 150 millions de degrés, ceci nous donnerait une densité de

$$10^{21} \text{ atomes par mètre cube.}$$

Dans les faits, les expérimentateurs doivent se tenir bien en de ça, à cause de la limite de densité de Greenwald. En effet, pour une valeur donnée de l'intensité du courant plasma, il existe une loi empirique, établie en 1988 par ce chercheur, qui fixe une limite supérieure à la densité, au delà de laquelle se produisent de terribles instabilités, appelées *disruptions*, très dommageables pour la machine.

Loi (totalement empirique) de Greenwald :

$$\text{densité maximale} = \frac{I_p (\text{courant plasma en méga-ampères})}{\pi (\text{petit rayon du tore en mètres})^2}$$

L'unité de densité est alors en 10^{20} atomes par mètre cube.

Sur ITER l'intensité du courant plasma serait de 15 millions d'ampères. Le petit rayon vaut 2 mètres. On obtient une limite de densité de Greenwald de $1,2 \cdot 10^{20}$ ions par mètre cube.

Cela nous permet de remonter vers la valeur limite de la pression de remplissage, avec cette fois $T = 300$ degrés absolus

$$p = n k T = 0,414 \text{ pascal}$$

quatre millièmes d'atmosphère !

Cette tendance à l'instabilité limite la pression que le champ magnétique de confinement pourrait tenir. Pratiquement, on est un ordre de grandeur en dessous.

Avec cette maquette en main, vous avez donc la machine sous les yeux, et êtes mieux à même de comprendre son comportement.

Il faut tout d'abord ajouter que le chauffage Ohmique ne permet pas de chauffer le plasma au dessus de 10 millions de degrés. Il faut donc adapter sur la machine des systèmes de chauffage additionnel, principalement des injecteurs de neutres, non représentés.

Ce système de chauffage consiste à accélérer des ions, puis à les neutraliser avant d'envoyer ces atomes neutres (de l'hydrogène lourd) dans la veine, en injectant ceux-ci perpendiculairement. En pénétrant dans la veine, ils s'ionisent et communiquent leur énergie aux ions.

Un autre système de chauffage consiste à placer des antennes dans la veine, qui produisent un « chauffage HF ».

La conjugaison de ces deux systèmes a permis d'obtenir une température de 150 millions de degrés dans la machine anglaise JET.

Le JET n'est pas la première machine où une telle température ait été obtenue. Cette température est la mesure de l'énergie cinétique d'un milieu porté à une température absolue T . A 150 millions de degrés ceci correspond à une vitesse d'agitation thermique de 1000 km/s.

C'est la vitesse qui permet aux ions de s'approcher suffisamment l'un de l'autre pour que la réaction de fusion se produise.

Le rythme des fusions dépend alors de la densité n des ions.

La fusion se produit quand le critère de Lawson est satisfait.

La température doit être entre 100 et 200 millions de degrés. Les physiciens des particules préfèrent employer une unité qui est l'électron volt, qui équivaut en gros à 10.000°K

Un keV est un kilo électron volt

100 millions de degré c'est 10 keV

Le critère de Lawson s'écrit, pour la fusion Deutérium Tritium :

$$n T \tau = 2,6 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV seconde}$$

τ est le temps pendant lequel le plasma est confiné,

En prenant une température de 20 keV et un temps d'une seconde, on obtient une densité de

$$n = 1,3 \cdot 10^{20} \text{ ions par mètre cube}$$

ITER

Cette maquette ne représente pas fidèlement la machine ITER, mais se rapproche plutôt des montages que sont Tore Supra et le JET anglais (et toutes les machines russes qui les ont précédé).

Quelle est la différence ?

Sur le principe, il n'y en a pas. Le plasma est créé par un champ électrique induit, produit par la montée d'un champ magnétique inducteur.

Dans Tore Supra et le JET, le montage est similaire à celui d'un transformateur, dont le tore de plasma représenterait le secondaire. La puissante armature de fer représente le « noyau » de cet électro-aimant. Il est évident alors que les

lignes du champ magnétique suivent ces poutres de section carrée.

ITER en est dépourvu. Le solénoïde centrale est constitué par des éléments supraconducteurs, empilés (six). Il n'y a pas de « noyau de fer doux ». En fin de tir le champ créé sur l'axe atteint 13 teslas. Ce champ magnétique s'épanouit et ses lignes traversent la chambre où se trouve le gaz à très basse pression. Le champ électrique induit obéit alors à l'équation de Maxwell :

$$\nabla \times E = - \frac{dB}{dt}$$

Raisonnons en termes d'ordres de grandeur. Le champ électrique créé sera de l'ordre de dixième de volt par mètre (...). La longueur caractéristique est le périmètre pris sur « l'âme du tore » (25 mètres sur ITER).

B est le champ magnétique, en teslas.

t sera alors la durée du « tir ».

Avec une montée linéaire du champ, on obtiendra un champ électrique constant.

La valeur du champ magnétique qui traverse la chambre est plus faible que celle du champ régnant au voisinage de l'axe de la machine. En situant ce champ à hauteur de quelques teslas et le champ électrique à quelques dixièmes de volts par mètre on voit qu'on débouche sur des durées de tir se chiffrant en centaines de secondes.

Ce champ induit va créer dans la chambre un courant plasma de 15 millions d'ampères, lequel produira le champ magnétique « poloïdal » qui donne aux lignes de champ une forme spiralée.

Le champ poloïdal doit être limité (qui conditionne le nombre de tours qu'une particule chargée doit faire pour « faire le tour de la chambre »).

Sur mes maquettes, j'ai figuré des « rythmes d'enroulement différents ». C'est le cas à l'intérieur de la chambre. Les particules, en régime établi empruntent des trajectoires spiralées qui s'inscrivent sur une famille de tores qui sont disposés comme des « poupées russes » autour de l'âme du tore.

Quand on passe d'une surface à une autre, les angles des trajectoires spiralées sont différents. Cela se traduit par un « cisaillement ». Si celui-ci est trop élevé, le plasma deviendra instable. Phénomène décrit par Kruskal et Shafranov (limite de Kruskal-Shafranov).

Donc un ne cherche pas à avoir le courant plasma le plus élevé possible. Il est lié à la valeur du champ toroïdal avec lequel on travaille, lui-même dépendant des performances des bobines supraconductrices (5,3 teslas dans ITER).

Un empilement de bobines supraconductrices, sans noyaux, peut ainsi produire un champ inducteur suffisant.

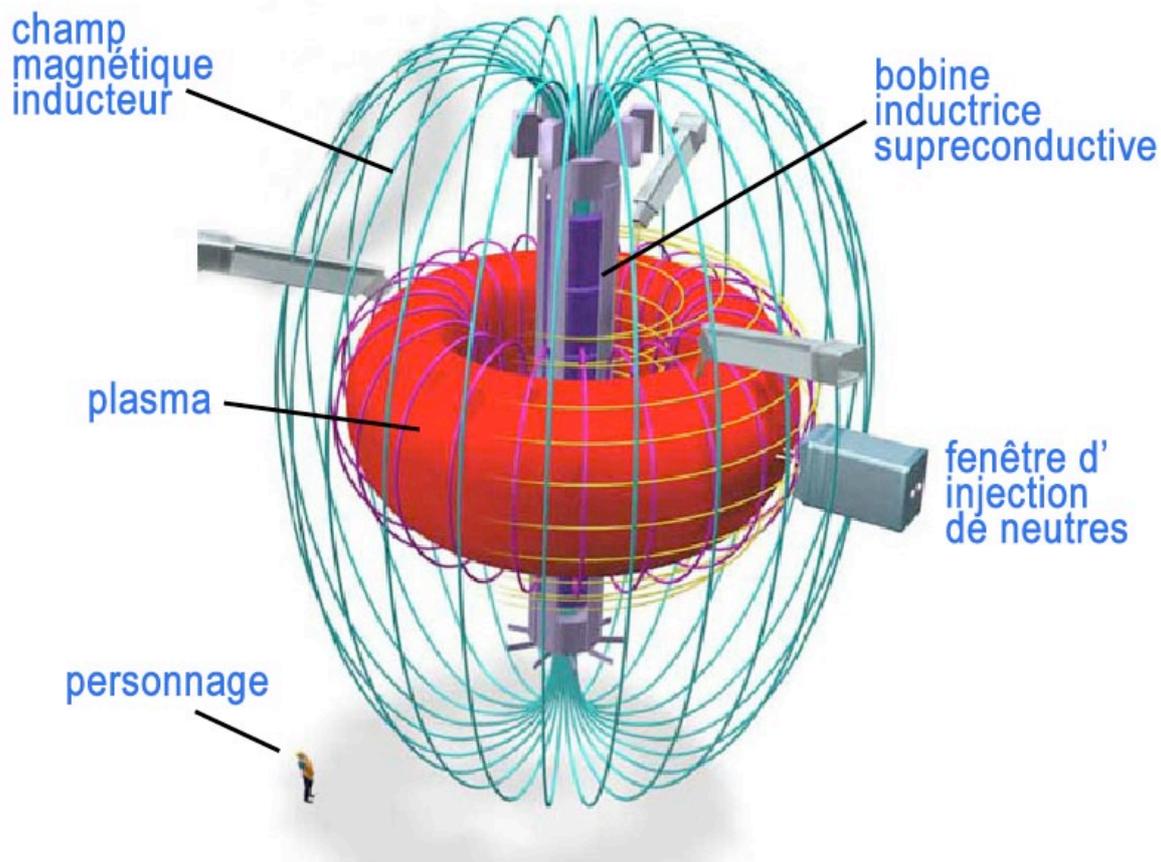


Image extraite du site du CEA-ITER

Les pages 8 à 12 vous permettront de monter la maquette d'ITER,

Le jouet le plus cher du monde.