

MP 35 : Moteurs

Vincent DE ZOTTI et Charles-Edouard LECOMTE

Mardi 8 avril 2014

Table des matières

1 Moteur thermique	2
1.1 Principe du moteur de Stirling	2
1.2 Diagramme (P, V)	3
1.3 Puissance fournie à une charge	3
2 Moteur électrique	4
2.1 Mise en évidence des forces électromagnétiques	4
2.2 Moteur à courant continu	5
2.2.1 Principe	5
2.2.2 Étude électrique	5
2.2.3 Étude mécanique	6
2.2.4 Rendement	7
2.3 Moteurs à courant alternatif	7
2.3.1 Moteur synchrone	8
2.3.2 Moteur asynchrone	8

Rapports du jury

À propos du nouveau titre

2013 : Moteurs électriques et thermodynamiques entrent dans le cadre de ce montage.

Jusqu'en 2013, le titre était : *Conversion de puissance électrique-mécanique*.

- **2013** : Comme pour le montage 21 (Conversion de puissance électrique-électrique, désormais Production et conversion d'énergie électrique), la notion de point de fonctionnement nominal est importante. D'autre part, les modèles utilisés pour décrire les convertisseurs sont souvent trop simplifiés. Il faut être capable d'interpréter l'écart entre le système idéal et le système réel.
- **2012** : Même si l'étude d'un haut-parleur relève du thème, il existe bien d'autres exemples, et souvent d'intérêt industriel (le moteur électrique est à l'ordre du jour). Il convient d'insister sur l'aspect quantitatif de la conversion électrique-mécanique.
- **2011** : Même si l'étude d'un haut-parleur relève du thème, l'aspect quantitatif de la conversion-électrique mécanique n'a pas été mis en oeuvre avec succès.
- **2010** : Comme pour le montage 21 (Conversion de puissance électrique-électrique), la notion de point de fonctionnement nominal est importante. D'autre part, les modèles utilisés pour décrire les convertisseurs sont souvent trop simplifiés. Il faut être capable d'interpréter l'écart entre le système idéal et le système réel. L'intitulé change légèrement en 2011 afin de l'harmoniser avec celui du numéro 21 : conversion de puissance électrique-mécanique.
- **2009** : Comme pour le montage précédent, la notion de point de fonctionnement nominal est importante.
- **2007** : Un effort pédagogique incluant une approche physique des phénomènes impliqués dans le fonctionnement des moteurs permet d'éviter un montage constitué d'une série de mesures sans logique apparente.
- **2005** : Les hacheurs (même sous la forme série, la plus simple) ne sont pas utilisés pour alimenter les moteurs à courant continu.

Jusqu'en 2004, le titre était : *Conversion de puissance (électrique-électrique, électromécanique...)*.

- **2004** : Ce montage, relativement peu choisi cette année, a donné lieu à des prestations assez pauvres, alors que des matériels d'électrotechnique adéquats sont disponibles. La conversion électrique-électrique semble se limiter, sauf exception, au transformateur et, pire, la conversion électrique-mécanique à de vagues principes. Il y a pourtant dans la collection ce qu'il faut pour des mesures de rendements électromécaniques : sur ce point, il est préférable de bien expliquer les fonctions de chacun des éléments de la chaîne de conversion (ce qui suppose qu'elles sont bien comprises), plutôt que de se contenter d'estimer un rendement global dont l'interprétation ne débouche sur rien de vérifiable. Notons, en remarque technique, qu'il est souhaitable que tous les bancs de manipulations d'électrotechnique soient complets, c'est à dire avec leurs alimentations, hacheurs et systèmes de mesures spécifiques complets ; globalement, sur l'ensemble de la collection, il est vrai qu'il est toujours possible de se débrouiller.
- **2000** : Trop de montages se limitent à des puissances symboliques de l'ordre du milliwatt. Limiter l'étude au redressement par diode, suivi d'un lissage par condensateur, ne couvre évidemment pas le sujet.

Références

- [1] BRÉBEC, J.-M. *et al*, Électronique II (PSI), H-prépa
- [2] BRENDERS, P., DOUCHET, L., SAUZEIX, M., Électrotechnique – Conversion de puissance (PSI), Les nouveaux précis Bréal
- [3] DONNINI, J.-M., QUARANTA, L., Électricité et applications, Dictionnaire de physique expérimentale, Pierron
- [4] TAILLET, R., VILLAIN, L., FEBVRE, P., Dictionnaire de physique, De Boeck

Introduction

[4]

On met en route le moteur de Stirling deux minutes avant de commencer.

Un moteur est un dispositif permettant de fournir du travail : sur un cycle, le travail donné par le reste de l'univers est négatif. On distingue deux types principaux (il en existe d'autres types) :

- les moteurs thermiques, qui fournissent du travail à partir de chaleur ;
- les moteurs électriques, qui fournissent du travail à partir de forces électromagnétiques.

On va étudier ces deux types : avantages et inconvénients, rendement, applications, ...

1 Moteur thermique

On étudie un moteur de Stirling, breveté en 1816 par Robert Stirling.

1.1 Principe du moteur de Stirling

Le moteur de Stirling, en fonctionnement réversible, parcourt le cycle présenté en figure 1. Ce cycle est composé de quatre étapes :

1. un chauffage isochore ;
2. une détente isotherme ;
3. un refroidissement isochore ;
4. une compression isotherme.

On explique le principe du moteur sur le dispositif (en faisant tourner la roue). Il est constitué de deux parties : une en contact avec une flamme (source chaude) et l'autre en contact avec des ailettes de refroidissement (source froide) liés par un petit conduit. Le volume total est fixé par un premier piston, un deuxième piston en quadrature assure des échanges de volume entre les deux parties.

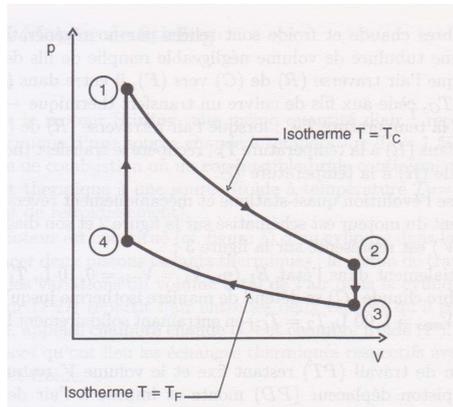


FIGURE 1 – Cycle idéal

On peut obtenir le volume total et la pression ainsi :

- faire chauffer le moteur en avance ;
- brancher les deux câbles (secteur+mesure) : la diode clignote ;
- mettre le piston du côté froid le plus bas possible, appuyer sur le bouton rouge ;
- lancer le moteur en une fois, il ne doit pas revenir en arrière.

1.2 Diagramme (P, V)

Expérience On trace le cycle (P, V) (± 5 V de calibre, 0.1 s d'acquisition).

- On mesure le temps de parcours du cycle : $T_{\text{cycle}} =$
- On exporte les données sous Regressi, on réalise les conversions (voir documentation), on calcule l'aire du cycle (fonction aire sur Regressi) $W_{\text{cycle}} =$ et la puissance :

$$\mathcal{P} = \frac{W_{\text{cycle}}}{T_{\text{cycle}}}$$

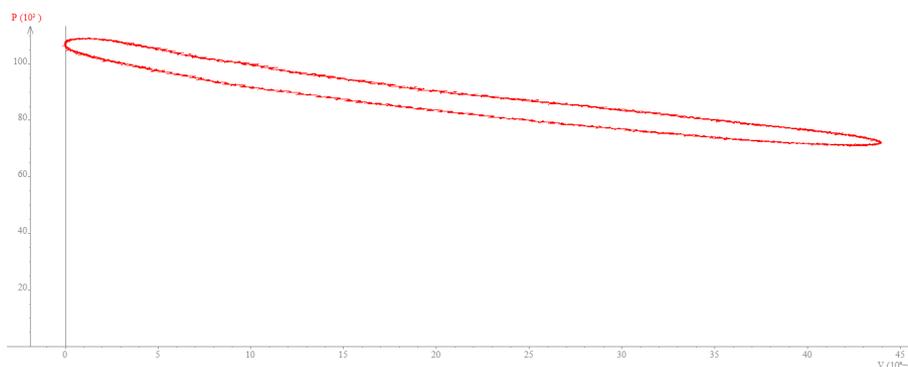


FIGURE 2 – Cycle réel du moteur de Stirling.

On va maintenant s'intéresser à la puissance qu'il peut fournir à une charge (but du moteur).

1.3 Puissance fournie à une charge

On ne peut pas mesurer le rendement η du moteur car on n'a pas accès aux sources froides et chaudes (si on estimait à partir du $\Delta_r H^0$ de combustion de l'éthanol, on obtiendrait un rendement ridicule car la flamme sert plus à chauffer l'air ambiant que faire tourner le moteur). Pour l'évaluer, on va supposer que Q_c est à peu près constant, dans ce cas, le rendement évolue comme la puissance fournie par le moteur. Celle-ci

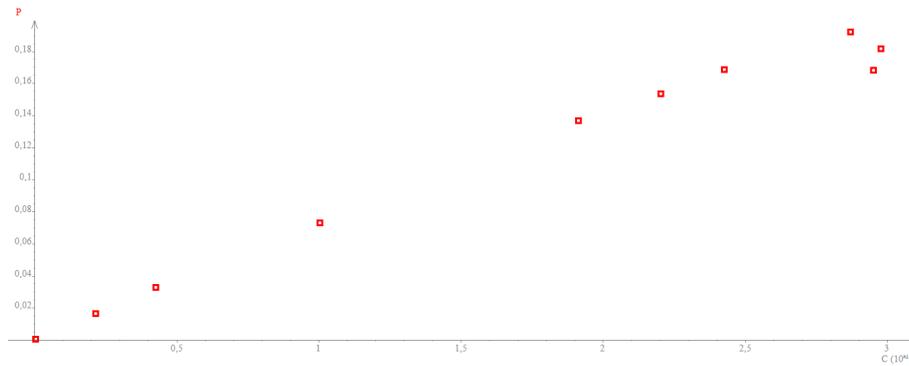
vaut :

$$\mathcal{P}_{\text{fournie}} = \frac{U^2}{R} \equiv C\omega$$

On mesure U et ω pour différentes charges R .

Expérience On relie avec la courroie le moteur à la génératrice, on enlève la petite ampoule, on fait débiter sur une boîte à décade avec un voltmètre et on mesure le volume à l'oscilloscope pour avoir la fréquence.

On trace $\mathcal{P} = f(C)$:



On a un maximum pour :

$$\begin{cases} \mathcal{P}_n = 0.19 \pm 0.02 \text{ W} \\ C_n = 2.8 \pm 0.2 \text{ N.m} \end{cases}$$

Pour des couples plus importants, le moteur s'arrête.

Les moteurs thermiques présentent une grande flexibilité (autonomie en particulier) mais possèdent un rendement faible, du fait de la limite de Carnot en particulier.

2 Moteur électrique

[3, 1]

2.1 Mise en évidence des forces électromagnétiques

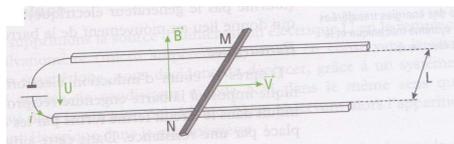


FIGURE 3 – Rails de Laplace.

Expérience des rails de Laplace On utilise le dispositif ENSL et un aimant permanent.

Il s'exerce sur le rail une force :

$$d\vec{F} = i d\vec{l} \times \vec{B}$$

On obtient l'opposé en changeant le sens de \vec{B} .

Pour la conversion électrique-mécanique, il faut :

- un champ magnétique, créé par un aimant permanent ou par induction (dans un matériau ferromagnétique) ;
- un courant, soit continu (MCC), soit alternatif (machines synchrones et asynchrones).

2.2 Moteur à courant continu

2.2.1 Principe

[1]

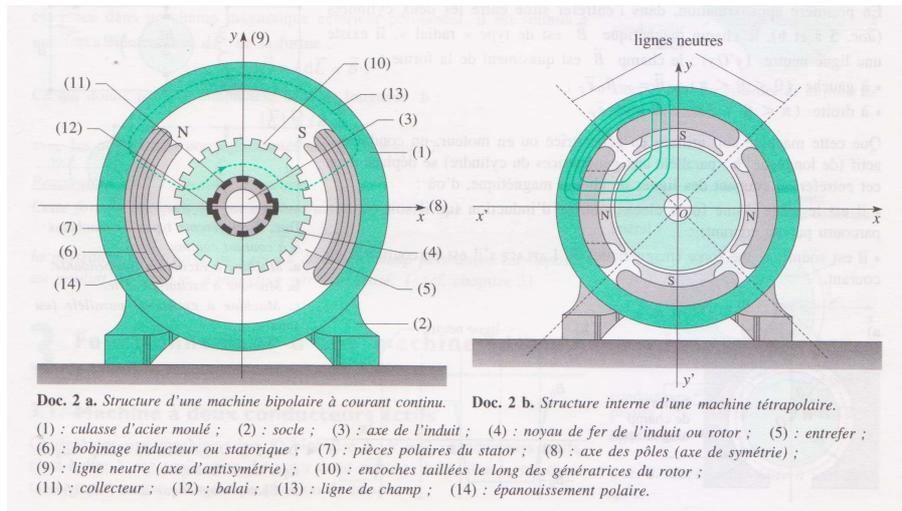
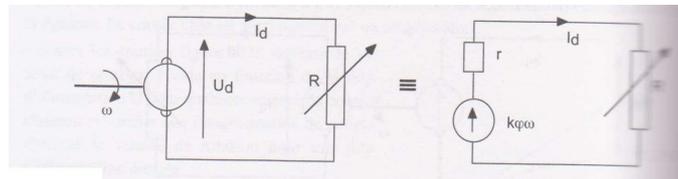


FIGURE 4 – Schéma d'une machine à courant continu.

Le moteur à courant continu est constitué par :

- un stator, fixe, dans lequel on fait passer un courant I_e dans des bobinages pour créer un champ \vec{B} radial ;
- un rotor, en rotation, dans lequel on fait passer un courant \vec{I} ce qui le met en rotation par le champ magnétique
- un collecteur, constitué par des balais qui permettent de changer le sens du courant à chaque demi-tour pour garder le même sens de rotation.

Le schéma équivalent de la machine à courant continu est :



À l'équilibre électrique et mécanique :

$$\begin{cases} U = E + rI = k\phi\Omega + rI \\ \Gamma = k\phi I - \Gamma_r \end{cases}$$

2.2.2 Étude électrique

Expérience On met en marche le moteur :

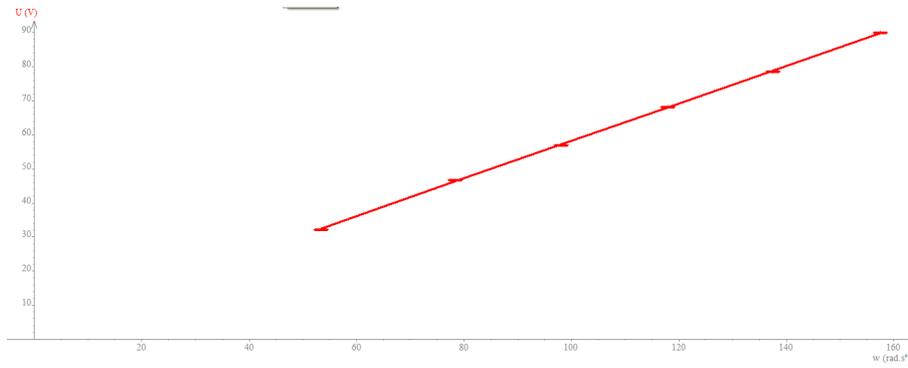
- alimenter les deux inducteurs (moteurs et génératrices) avec $U_e = 110 \text{ V}$ en parallèle,
- mettre un rhéostat en série avec l'induit avant de l'alimenter, puis le court-circuiter une fois le moteur en marche,
- faire les mesures sans charge dans cette partie (enlever la résistance de charge)

On fait le mesure de U , I et f , avec $U_e = 60 \text{ V}$ puis 80 V par exemple.

On trace sur Regressi $U = a\Omega + rI$:

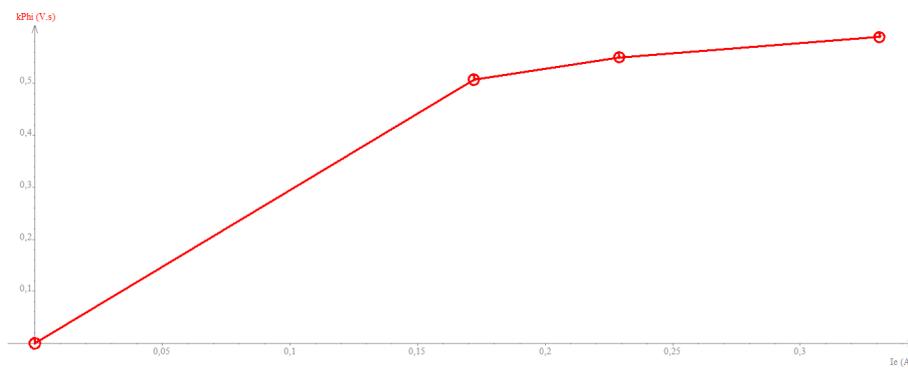
On en déduit :

$$\begin{cases} a = k\phi_1 = \\ r = \end{cases}$$



On compare la résistance r à la résistance statique $r_s =$

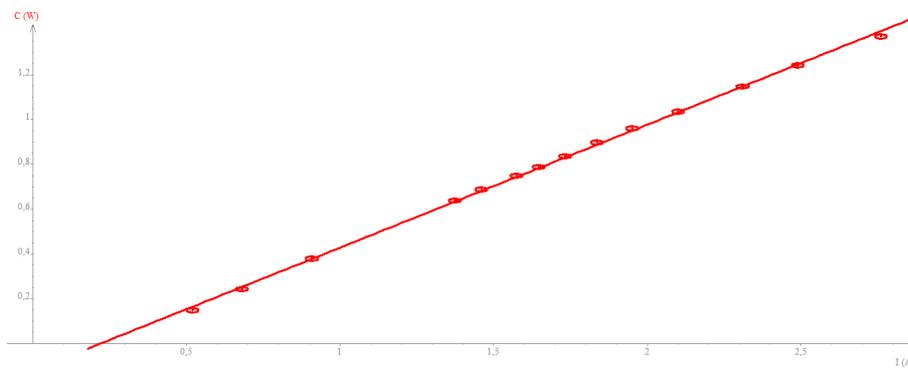
On peut également mesurer l'évolution de $k\phi$ avec le courant dans l'inducteur I_e : on vient de trouver $k\phi$ pour $U_e = 110$ V, on peut le faire pour plusieurs U_e , on trace $k\phi$ en fonction de I_e : on constate une saturation du flux, caractéristique des courbes d'aimantation des matériaux ferromagnétiques.



2.2.3 Étude mécanique

Expérience On fixe U_e et U aux valeurs nominales (110 V), on mesure le couple C et l'intensité I pour différentes charges. Mesurer aussi I_e et ω pour la suite. On modélise $C = f(I)$ par :

$$C = k\phi \times I - C_r$$



$$\begin{cases} k\phi = \\ C_r = \end{cases}$$

2.2.4 Rendement

On définit le rendement comme le quotient de la puissance utile et de la puissance donnée :

$$\eta = \frac{C\omega}{UI + U_e I_e}$$

À partir des données de l'étude mécanique, on trace $\eta = f(C)$ en figure 5.

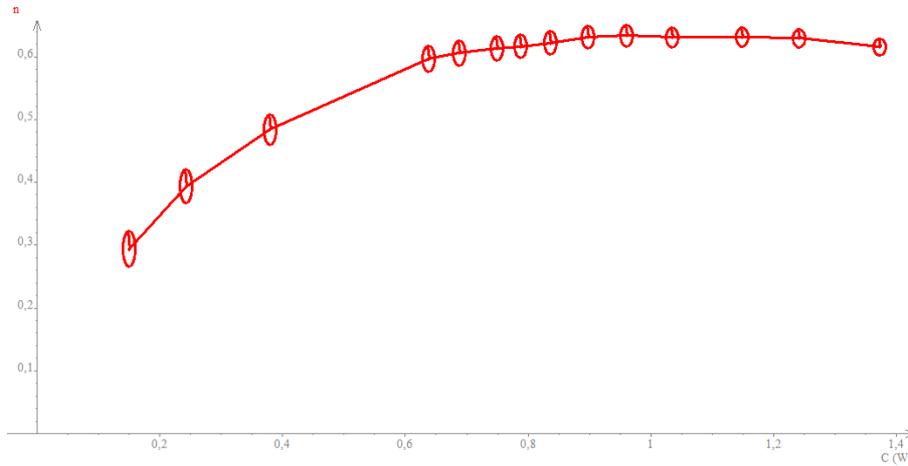


FIGURE 5 – Rendement du moteur à courant continu en fonction du couple.

On en déduit le couple nominal, celui pour lequel le rendement est maximal :

$$C_m =$$

À partir des données de $k\phi_1$ et de C_r , on déduit l'intensité nominale :

$$I_n = \frac{C_n + C_r}{k\phi_1}$$

et la vitesse angulaire correspondante :

$$\Omega_n = \frac{U_n - rI_n}{k\phi_1}$$

Évaluation des différentes pertes (en fonctionnement nominal) :

- Pertes Joule dans l'induit : $\mathcal{P}_{J,\text{induit}} = rI_n^2$: en pourcentage :
- Pertes Joule dans l'inducteur : $\mathcal{P}_{J,\text{inducteur}} = r_e I_e^2$: en pourcentage :
- Pertes par frottement mécanique : $\mathcal{P}_{\text{frottements}} = C_r \Omega_n$: en pourcentage :
- Les autres pertes sont dues aux pertes de flux et aux pertes par hystérésis dans le matériau ferromagnétique.

Les principaux avantages du moteur à courant continu sont la commande facile de la vitesse angulaire (par U), l'adaptation à la charge. Le problème est que le collecteur est fragile.

Il est utilisé en faible puissance dans de nombreuses petites applications (démarreur d'automobiles, essuies-glace, outillage), mais aussi parfois en fortes puissances (locomotives, TGV jusqu'aux années 1980).

2.3 Moteurs à courant alternatif

Ils sont basés sur la création d'un champ magnétique tournant, et l'interaction de ce dernier avec un moment magnétique, générant un couple :

$$\vec{\Gamma} = \vec{M} \times \vec{B}$$

On distingue deux types donnant deux types de moteurs :

- les moments magnétiques permanents (ou induit séparément) : moteurs synchrones
- les moments magnétiques induits par le champ tournant : moteurs asynchrones

Plutôt que de refaire une étude énergétique sur le même principe, on va se contenter de décrire qualitativement le principe de ces deux moteurs.

2.3.1 Moteur synchrone

L'aimant de moment magnétique \vec{M} ne va être en équilibre que s'il tourne à la même vitesse angulaire que le champ magnétique. Pour cela, il nécessite d'être lancé initialement pour accrocher au champ.

Expérience On illustre le principe avec un champ tournant créé par trois bobines (≈ 40 mH), et guidé par un matériau ferromagnétique (plein et feuilleté (bleu)). On place l'aiguille de boussole au centre, elle nécessite d'être lancée pour tourner.

L'avantage résulte dans le grand rendement de ces moteurs, et d'une vitesse de synchronisation très précise. Cependant, elle nécessite d'être lancée.

La machine synchrone a beaucoup été utilisée pour la conception de machines-outil, des anciens TGV mais tend à être supplantée par la machine asynchrone. Elle est encore utilisée pour des applications de forte puissance (Renault Zoé et Peugeot iOn par exemple) ou de faible puissance (commande de disque dur d'ordinateur).

2.3.2 Moteur asynchrone

Le moment est induit par les courants de Foucault, d'après la loi de Lenz, l'objet va s'opposer à la variation de flux magnétique en se mettant à tourner dans le même sens. On a alors $\omega \rightarrow \omega_0$, mais l'objet n'atteindra jamais cette vitesse à cause des frottements.

Expérience On peut illustrer avec la cage d'écureuil (même montage), monter assez haut en tension (attention à l'intensité).

Elle permet d'obtenir des vitesses assez élevées, n'a pas besoin d'être lancée initialement, mais il est difficile d'avoir une vitesse de rotation précise.

Elle est de plus en plus utilisée grâce au développement de l'électronique de puissance (TGV récents, machines-outils, propulsion des navires,...).

Conclusion

Les moteurs ont une importance considérable dans la société moderne, il faut choisir le type de moteurs approprié en fonction de la tâche à réaliser, des contraintes économiques, écologiques,...

De plus, la plupart des moteurs sont réversibles, on peut les faire fonctionner en génératrice et produire ainsi de l'énergie électrique (barrages, éolienne).

Expérience Avec le moteur à courant continu, mettre une charge en sortie et mesurer la tension à ses bornes, en augmentant U , on augmente Ω et donc U_{R_e} .

On les étudiera dans un prochain montage.