



**C
P
E
I**

Rapport de projet

février - avril 2014

**Classe Préparatoire aux Écoles d'Ingénieurs - 2^e année
Université Paris Diderot**

Études énergétiques

Auteurs du rapport :

Clotaire Roques de Borda - Oscar Widemann

Responsables du projet :

Natacha Combier - Halloin Hubert

Introduction	5
Méthodes de travail	5
Hypothèses	5
<i>Hypothèses sur les orbites considérées</i>	5
<i>Hypothèses sur le satellite et l'environnement</i>	5
Objectifs	6
Étude de la puissance reçue	7
Objectifs	7
Méthode	7
Attitudes du satellite	7
<i>Attitude mission (ou attitude avion)</i>	7
<i>Attitude caillou</i>	7
<i>Attitude survie</i>	8
Résultats	8
<i>Bilans énergétique de l'attitude mission</i>	8
<i>Bilans énergétique des différentes attitudes</i>	9
Étude de la puissance consommée	10
Objectifs	10
Méthode	10
Types de consommations	10
<i>Type de consommation économique</i>	10
<i>Type de consommation maximale</i>	11
Résultats	11

Étude de la charge de la batterie au cours du temps	13
Objectifs	13
Méthode	13
Résultats	13
<i>Types de consommations en attitude mission</i>	<i>13</i>
1) <i>Type de consommation économique</i>	<i>13</i>
2) <i>Type de consommation maximale</i>	<i>15</i>
<i>Attitudes en consommation économique</i>	<i>16</i>
1) <i>Attitude caillou</i>	<i>17</i>
2) <i>Attitude survie</i>	<i>18</i>
Conclusion de l'étude	20
Conclusions	20
Pistes à suivre	20
Remerciements	21

Table des Figures

Évolution de la puissance reçue en fonction du RAAN	P8
Puissance différentielle moyenne en fonction du RAAN	P9
Puissance consommée instantanée en fonction du temps	P11
Puissance reçue dans différentes attitude en fonction du RAAN	P12
Charge : attitude mission - économique - cas meilleur	P13
Charge : attitude mission - économique - cas médian	P14
Charge : attitude mission - économique - cas pire	P15
Charge : attitude mission - consommation maximale - cas meilleur	P15
Charge : attitude mission - consommation maximale - cas médian	P16
Charge : attitude mission - consommation maximale - cas pire	P16
Charge : attitude caillou - consommation économique - cas meilleur	P17
Charge : attitude caillou - consommation économique - cas médian	P17
Charge : attitude caillou - consommation économique - cas pire	P18
Charge : attitude survie - consommation économique - cas pire	P18
Tableau bilan	P20

Introduction

Ce rapport consiste en un résumé du travail que nous avons fourni durant trois mois sur l'étude de l'évolution de la puissance électrique au sein du satellite au cours du temps, selon les orbites que l'on peut considérer comme intéressantes pour notre mission à ce stade.

Méthodes de travail

Nous avons tout d'abord estimé les orbites intéressantes que nous avons par la suite réduites à un cas simple ne dépendant que d'un paramètre : celui du RAAN (right ascension angle node), ou ascension droite du noeud ascendant, dans le cadre d'une orbite quasi polaire et interprétée comme héliosynchrone.

L'étude réalisée montre donc dans ce cadre l'évolution du bilan énergétique en fonction du RAAN.

Tous les calculs sont réalisés avec le logiciel « Scilab », le code commenté se trouve sur le google drive (études/projet_CPEI/oscar_clotaire/simulation_puissance.sce).

Hypothèses

Hypothèses sur les orbites considérées

On considère des orbites avec les propriétés suivantes :

- une altitude de 600 km
- une inclinaison de 97°
- une excentricité nulle
- une anomalie moyenne de -90°
- on considère de telles orbites comme héliosynchrones

Hypothèses sur le satellite et l'environnement

On considère que les faces latérales comportent 7 demis panneaux solaires, 2 pour la face avant.

Les panneaux solaires ont les caractéristiques suivantes :

- ils ont une surface de 40 cm^2
- ils ont une efficacité de 25%

La puissance surfacique moyenne solaire est de 1370 W.m^{-2} aux altitudes considérées.

On considère l'existence de deux stations sols (Paris et Hanoï).

On considère une batterie nanopwer p31U qui a pour caractéristiques :

- une charge maximum de 2,6 Ah
- une tension maximum de 7,4 V

Nous avons simulé l'orbite du satellite sur 10 jours pour obtenir des valeurs moyennes vraisemblables.

Nous avons pour les premières parties de cette étude considéré le mode « mission » du satellite, c'est à dire incliné vers l'arrière de sa trajectoire avec un spin.

Objectifs

Nous avons quatre objectifs principaux :

- étudier la puissance électrique reçue
- étudier la puissance électrique consommée
- réaliser différents modes de consommation et de positionnement du satellite
- étudier l'évolution de la charge de la batterie au cours du temps dans ces différents modes

Étude de la puissance reçue

Objectifs

Dans cette partie de l'étude nous avons cherché à comparer les bilans de puissance électrique reçue en fonction du RAAN considéré. D'après les hypothèses posées plus haut, seul le RAAN influe considérablement sur l'ensoleillement du satellite, et donc de la puissance reçue.

Méthode

Nous avons d'abord testé différents RAAN jusqu'à déterminer trois cas intéressants : deux cas « critiques » et un cas « médian » :

- pour un RAAN de 0 (cas « meilleur »), l'énergie reçue est maximale
- pour un RAAN de $\pi/2$ (cas « pire »), l'énergie reçue est minimale
- un RAAN de $\pi/4$ correspond au cas médian

Cela est dû à la date de départ (solstice d'été), qui rend le plan de l'orbite perpendiculaire au soleil dans le cas « meilleur » et parallèle dans le cas « pire ». Cela donne principalement une différence au taux d'éclipse qui passe de 0% dans le cas meilleur à environ 40% dans le cas pire.

Attitudes du satellite

Ces attitudes correspondent aux différents positionnements du satellite au cours de son orbite, et répondent à différents besoins.

Quel que soit l'attitude, le scintillateur reste normalement opérationnel, il ne nécessite pas un positionnement particulier.

Attitude mission (ou attitude avion)

Cette attitude est l'attitude principale du satellite, car elle permet de prendre d'une façon optimale les mesures que l'on cherche à réaliser.

Avec cette attitude, le satellite subit un spin selon l'axe de sa trajectoire tout en maintenant un angle avec celle-ci de 30° vers l'arrière. Cet angle permet d'obtenir des mesures par occultation des GPS.

Attitude caillou

Cette attitude correspond à l'absence de contrôle sur la rotation du satellite. Elle est simulée par un spin dans une direction aléatoire au cours du temps.

Elle nous permet de faire des estimations dans le cas où nous perdrons le contrôle du satellite (défaillance technique, absence de batterie...).

Attitude survie

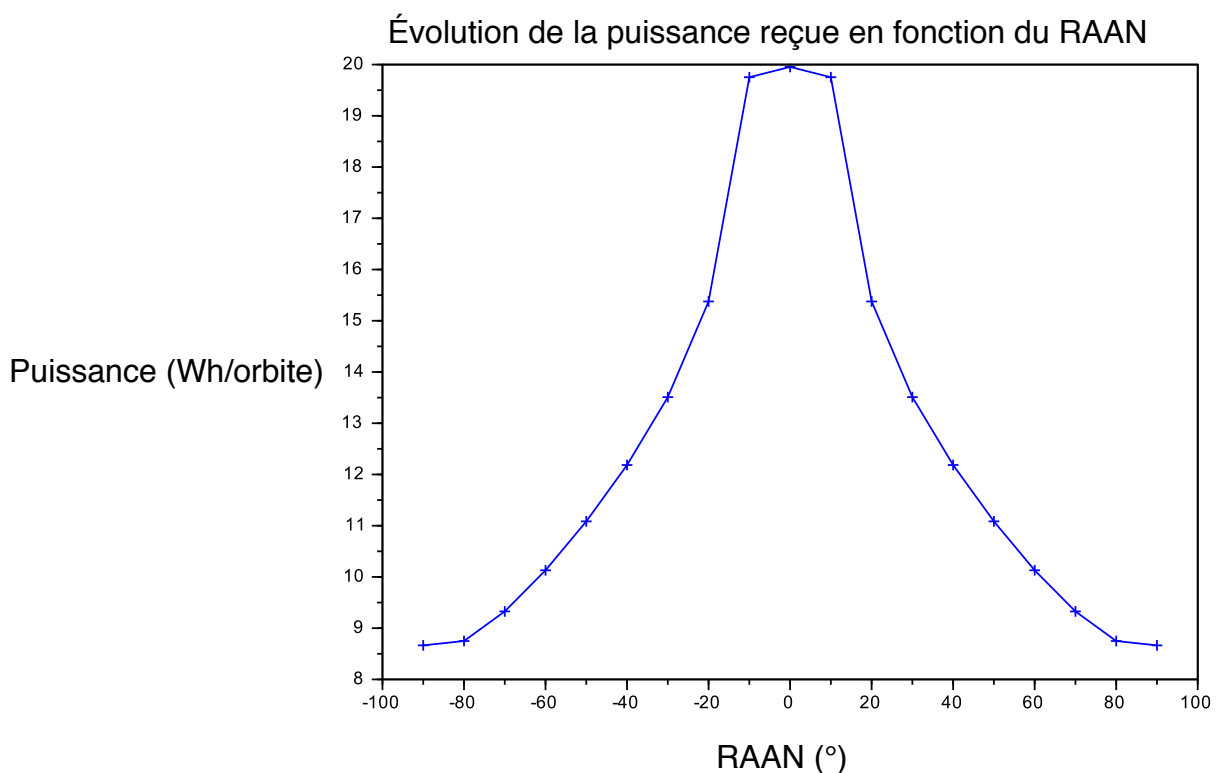
Cette attitude correspond à une inclinaison du satellite visant à ce que les faces latérales soient orientées vers le soleil, puis imposant un spin selon l'axe vertical du satellite (ne décalant pas l'alignement latéral avec le soleil).

Elle permet d'obtenir, quelle que soit l'orbite, une puissance solaire reçue maximale, et donc de recharger les batteries.

Elle serait potentiellement utilisée dans le cas d'une orbite où le bilan différentiel énergétique est négatif (voir la figure « Puissance différentielle en fonction du RAAN »), afin de périodiquement recharger les batteries entre des séries de mesures.

Résultats

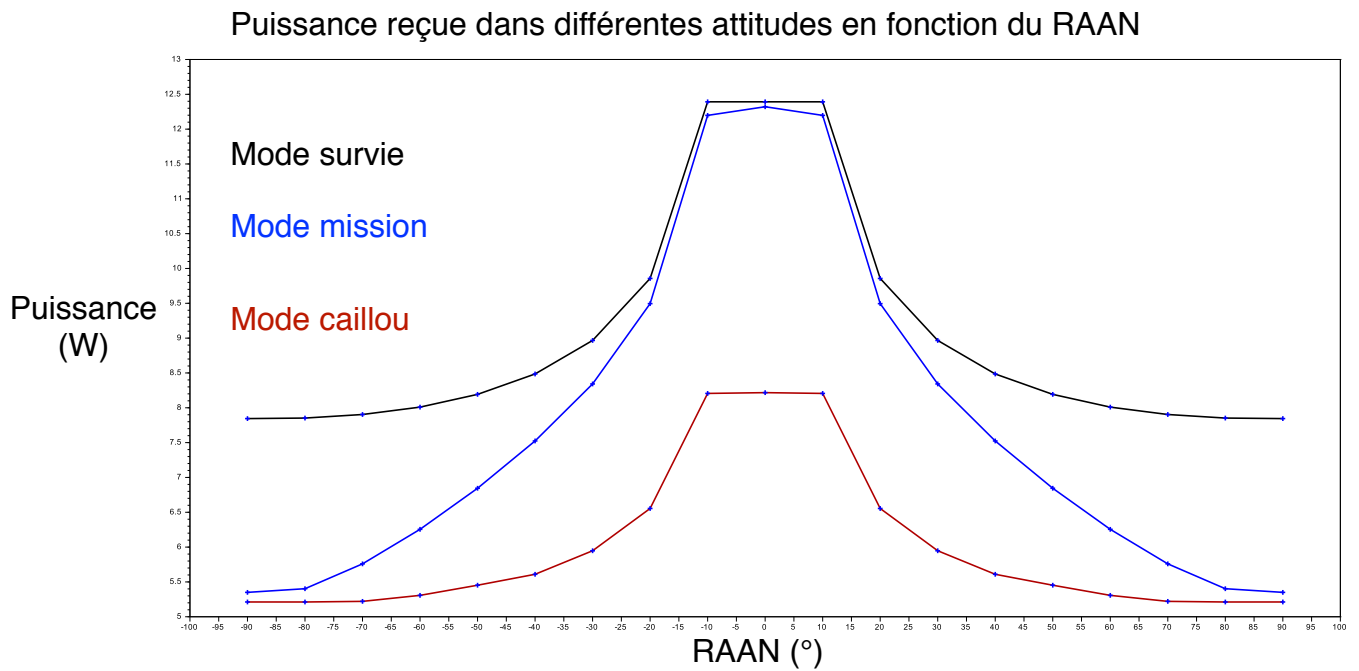
Bilans énergétique de l'attitude mission



On peut voir qu'il y a un rapport d'1,5 entre la puissance reçue dans le cas médian et le cas pire, et un rapport de 2,5 entre celles du cas meilleur et du cas pire.

Il est donc nécessaire de prendre en compte cette différence si l'on souhaite avoir un satellite viable quelque soit l'orbite.

Bilans énergétique des différentes attitudes



On voit bien une différence majeure dans les cas pire entre l'attitude survie et les autres. Cette attitude semble donc être propice à la recharge des batteries pour ces orbites.

Étude de la puissance consommée

Objectifs

Nous avons cherché dans cette partie à estimer la puissance électrique nécessaire au satellite pour fonctionner, à différents RAAN.

Méthode

Nous avons combiné les résultats d'une étude précédente (pré_analyse architecture électrique d'Aymar Quarré de Boiry, Thomas Dufour et Olivier Samin) sur la consommation des composants électriques nécessaires aux satellites, avec une estimation plus fine de la consommation des composants contextuels (voir ci dessous).

Types de consommations

Tous les types de consommations sont calculés avec une marge d'erreur de 30%, permettant l'ajout de composants dans une phase ultérieure du projet.

Type de consommation économique

C'est le type de consommation utilisé dans tous les calculs précédents.

Il correspond à une consommation constante des composants vitaux du satellite (processeur...) et à une consommation ponctuelle des autres composants.

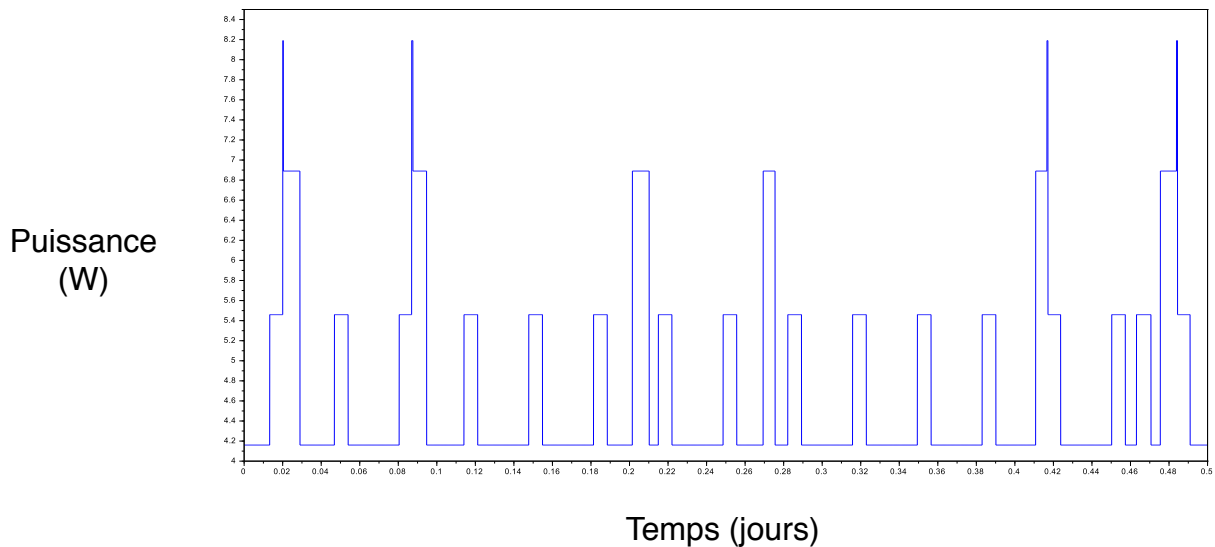
Autrement dit, le récepteur GPS n'est actif que lorsque le satellite survole les zones où des mesures sont pertinentes, ce qui correspond à l'anomalie de l'Atlantique (longitude comprise entre -90° et 40° / latitude comprise entre -40° et 0°) et aux pôles ($| \text{latitude} | > 70^\circ$).

De même, il n'y a émission de données que lors du survol des stations sols. Le calcul de position du satellite est fait en temps réel par la simulation.

Ce type de consommation permet une estimation réaliste de la consommation du satellite durant sa mission.

Sur une demie journée, cela donne ce graphique :

Puissance consommée instantanée au cours du temps



Type de consommation maximale

Ce mode correspond à l'activation de tous les composants en permanence.

Il permet d'éviter une puissance excédentaire dans le cas d'une orbite trop favorable d'un point de vue énergétique.

Ce mode a été rajouté afin d'essayer d'estimer les surplus énergétiques pour ces orbites, afin de garder un bilan thermique permettant la survie du satellite. À cette date, les études thermodynamiques correspondantes ne sont pas encore réalisées.

Résultats

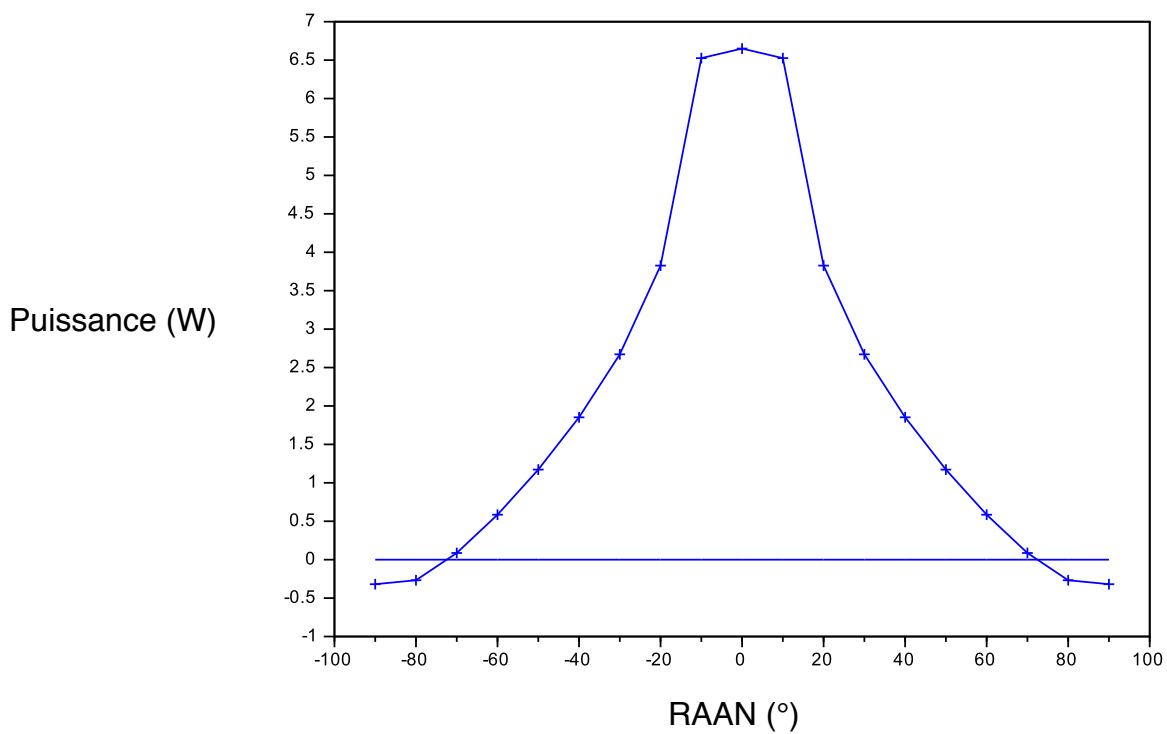
Nous avons obtenu les valeurs moyennes suivantes, pour un type de consommation économique :

- pour le meilleur cas, $P_{\text{consommée}} = 5,6 \text{ W}$
- pour le cas médian, $P_{\text{consommée}} = 5,7 \text{ W}$
- pour le pire cas, $P_{\text{consommée}} = 5,5 \text{ W}$

Cela montre que le RAAN n'influence pas la puissance consommée (les légères différences se lissant au cours d'une simulation plus longue).

On peut donc tracer l'évolution de la puissance différentielle moyenne en fonction du RAAN, différence de la puissance reçue par la puissance consommée :

Puissance différentielle moyenne en fonction du RAAN



La barre horizontale correspond au 0, autrement dit, l'énergie reçue est égale à celle consommée. En deçà, un problème se pose quant à la charge de la batterie. Nous étudierons ce point dans la dernière partie de cette étude.

Ce graphique nous permet de voir que le cas limite dans cette configuration se situe aux environs de 70°. Il nous faut donc, dans le cas où le RAAN serait supérieur à cette valeur, prévoir des changements d'attitudes ou de consommation permettant au bilan de puissance de redevenir positif.

Étude de la charge de la batterie au cours du temps

Objectifs

Dans cette partie de l'étude nous avons plusieurs objectifs :

- étudier les trois cas caractéristiques déjà définis (pire, médian et meilleur)
- étudier l'évolution de la charge de batterie dans chaque mode d'attitude
- étudier le cas d'un mode avion en consommation maximale

Méthode

On simule dans Scilab l'orbite du satellite, ce qui nous permet d'avoir à la fois la puissance électrique reçue et consommée à chaque instant. Par une intégrale selon le pas de temps, et les conversions appropriées, cela nous donne l'évolution de la charge de la batterie au cours du temps.

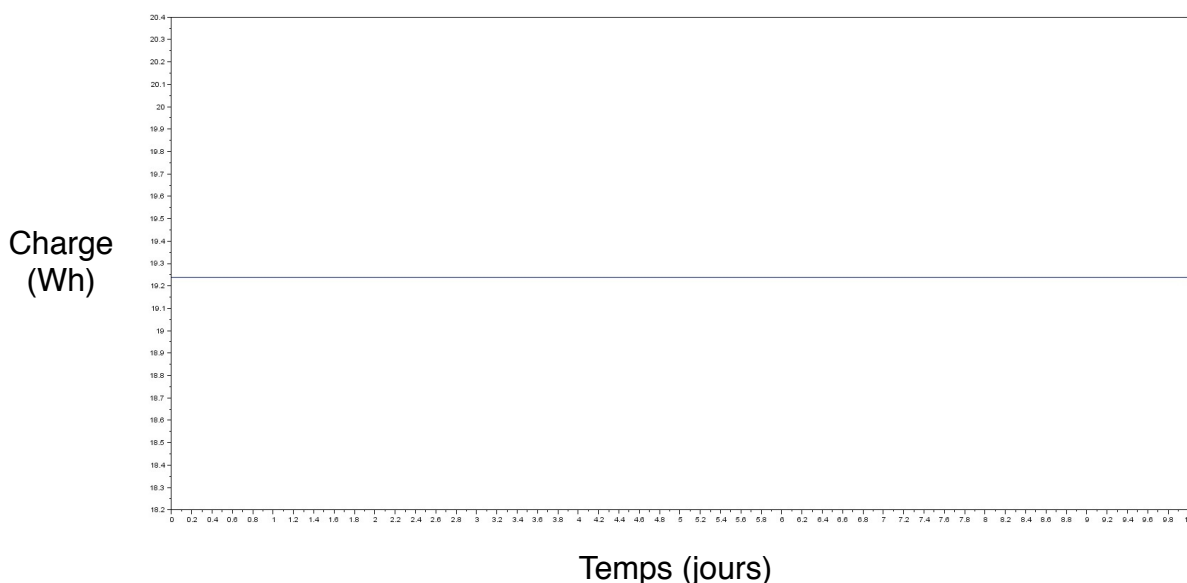
/!\ Nous parlons également des émissions de chaleurs mais uniquement celles liées à la réception d'énergie quand la batterie est pleine, aucune autre forme d'émission de chaleur (utilisation des composant électronique) ne se sera prise en compte. On nommera par la suite cette émission de chaleur la puissance excédentaire. Nos calculs n'ayant pas été terminés, nous ne donnerons ici qu'une approche qualitative aux valeurs de cette puissance. /!\

Résultats

Types de consommations en attitude mission

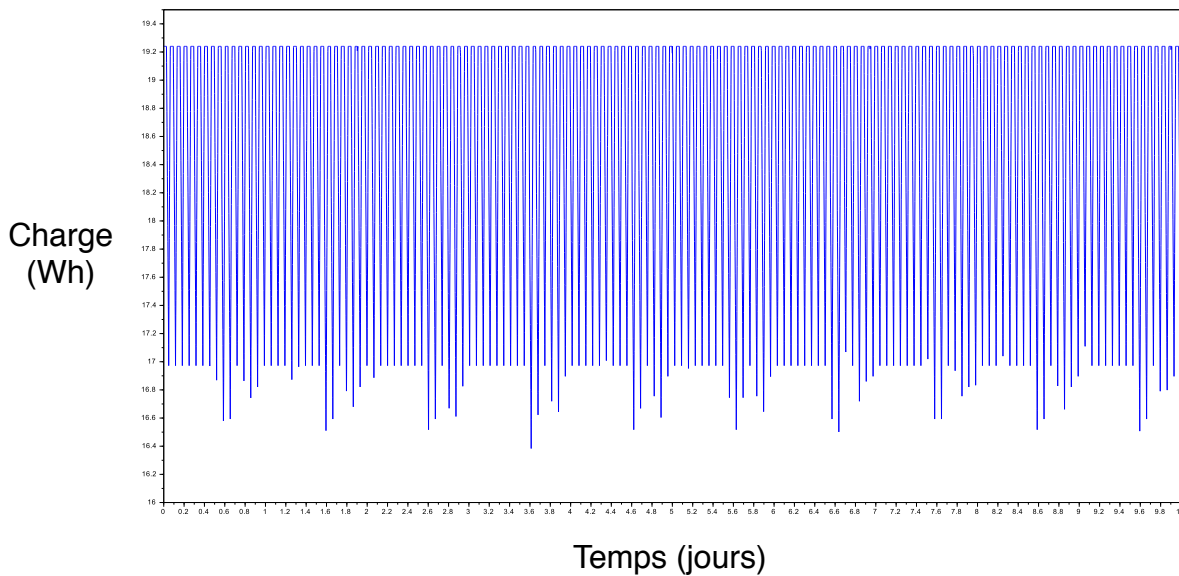
1) Type de consommation économique

Charge : attitude mission - économique - cas meilleur



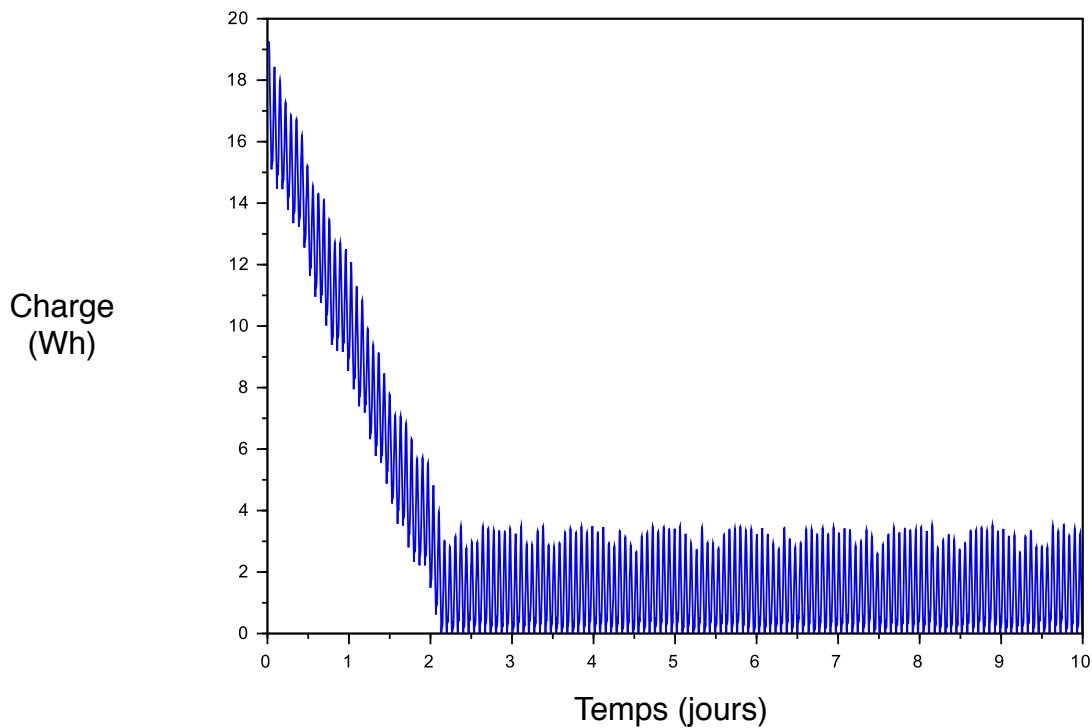
La valeur constante du graphique correspond à la valeur de la charge maximale de la batterie calculée à partir des hypothèses posées en introduction. On peut voir que la batterie ne diminue jamais au cours du temps, il y a donc une importante puissance excédentaire. Cela est dû au fait que le satellite reçoit en permanence plus d'énergie qu'il n'en consomme, et n'est jamais en éclipse.

Charge : attitude mission - économique - cas médian



Dans ce cas, la batterie est consommée au maximum à environ 15% de sa charge maximale, il reste donc au moins 85% de la charge en permanence. Le satellite arrive donc à se recharger entre chaque éclipse. Cela signifie qu'il y a une puissance excédentaire (moindre que dans le cas précédent).

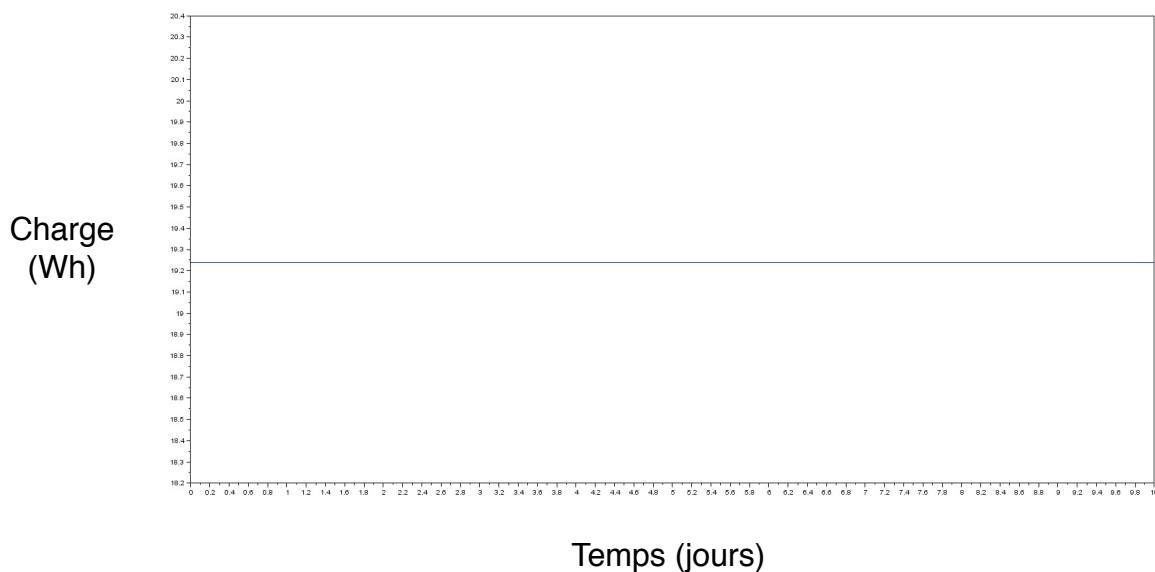
Charge : attitude mission - économique - cas pire



On voit que la batterie se vide au bout de deux jours, c'est donc un manque d'énergie qui pose problème ici. Les éclipses sont trop longues et fréquentes pour que le satellite arrive à se recharger complètement, ce qui entraine une décharge progressive de la batterie.

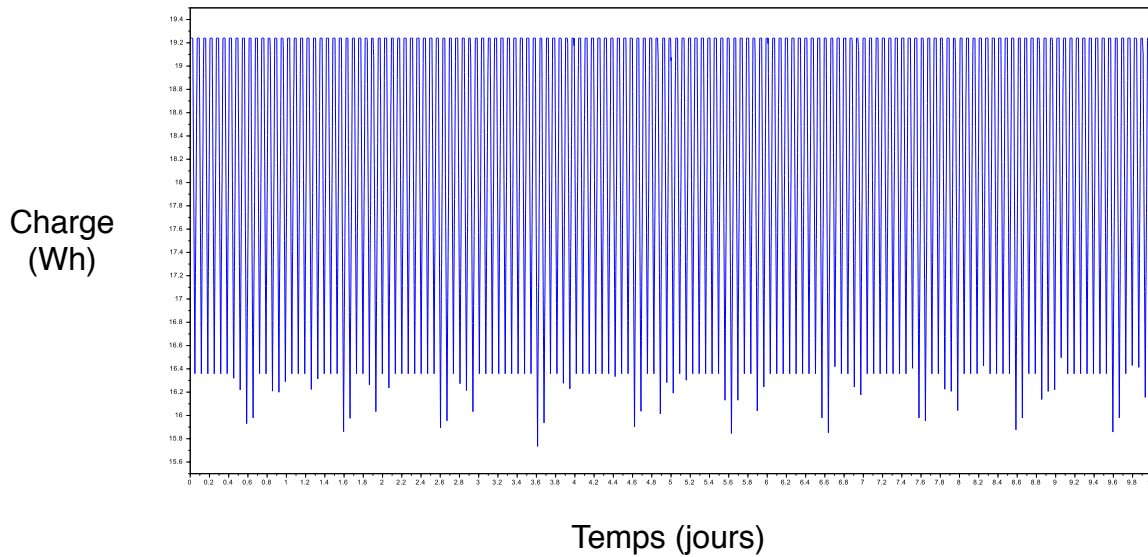
2) Type de consommation maximale

Charge : attitude mission - consommation maximale - cas meilleur



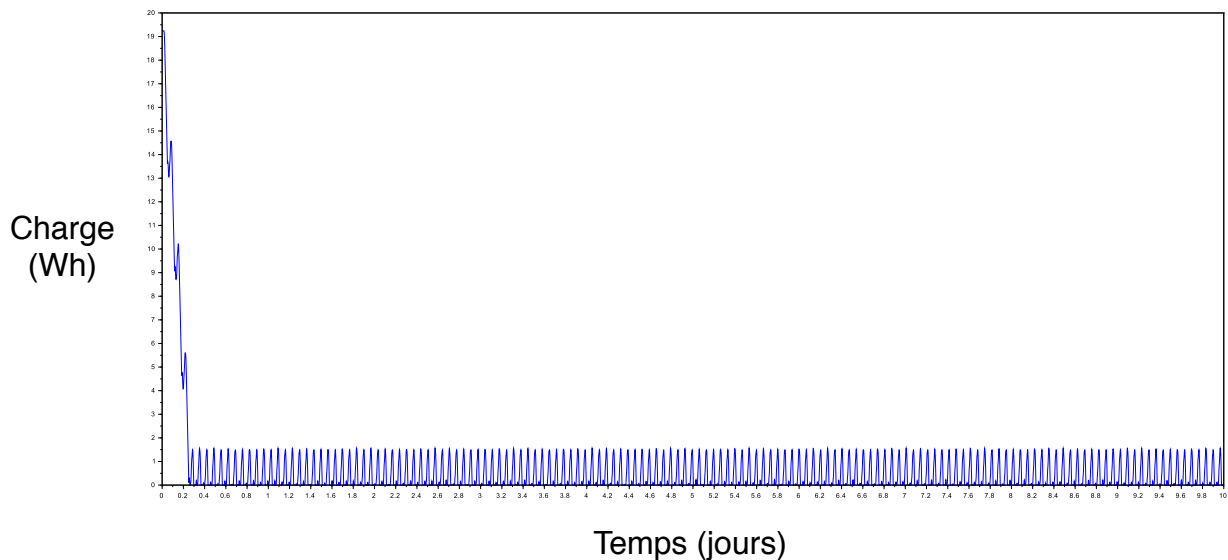
Comme dans le cas de la consommation économique, on a une forte puissance excédentaire, et la batterie se ne décharge jamais, malgré la consommation plus importante.

Charge : attitude mission - consommation maximale - cas médian



Encore une fois similaire au cas de la consommation économique, même si la charge de la batterie atteint des valeurs plus basses ici (il reste au minimum 80% de la charge totale). Il y a donc toujours une puissance excédentaire, même si elle est moins importante que dans les autres cas.

Charge : attitude mission - consommation maximale - cas pire

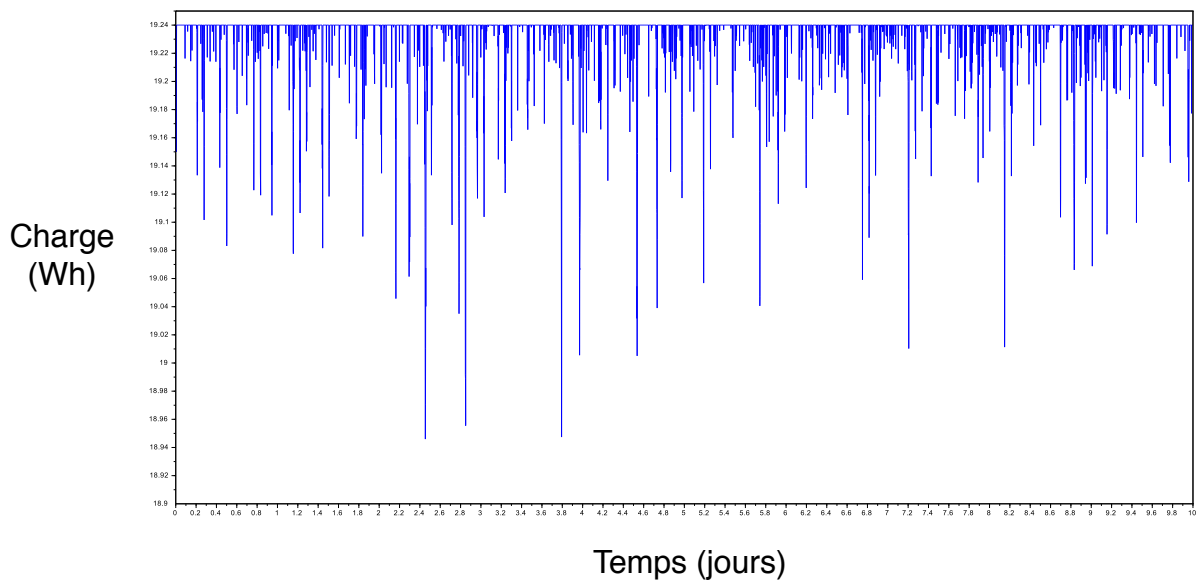


Ici, la batterie se vide rapidement, la batterie ne pouvant pas se recharger entre les éclipses et la consommation étant plus importante.

Attitudes en consommation économique

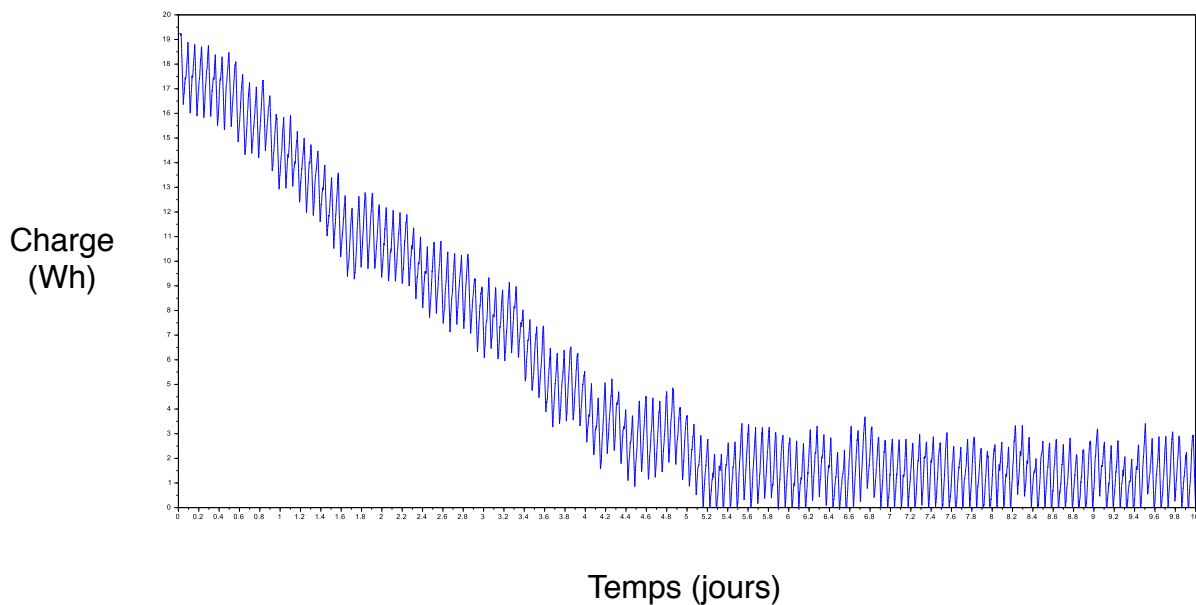
1) Attitude caillou

Charge : attitude caillou - consommation économique - cas meilleur



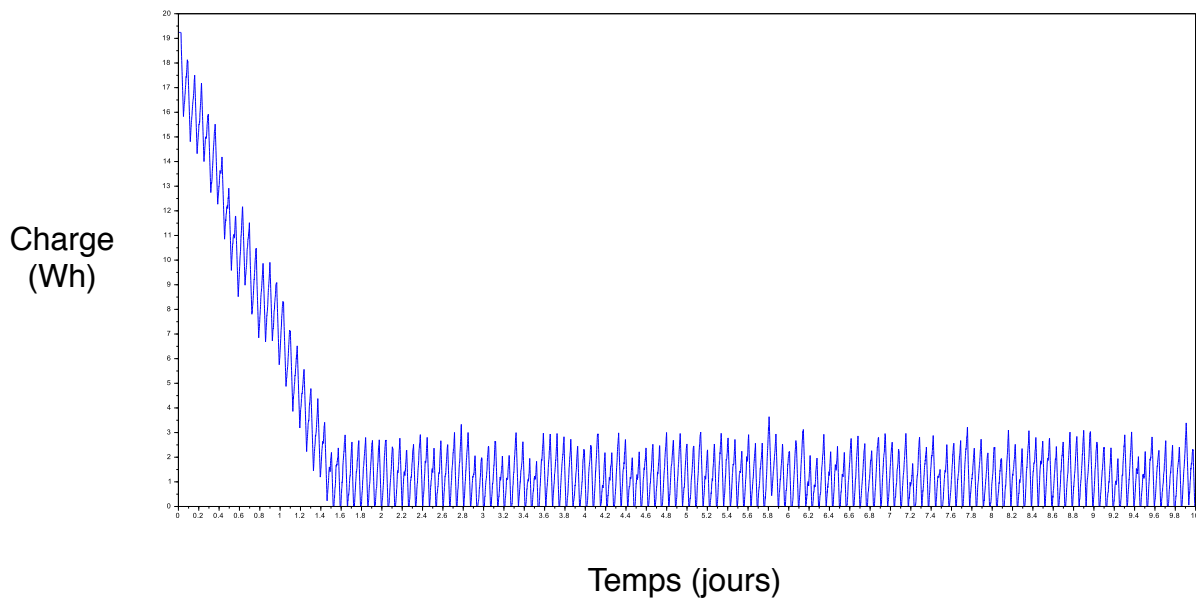
On voit que dans ce cas, la charge de la batterie varie mais ne s'annule jamais. Il y a donc potentiellement une puissance excédentaire à certains instants, selon les variables aléatoires.

Charge : attitude caillou - consommation économique - cas médian



On voit que dans ce cas, la batterie se vide lentement selon les variables aléatoires mais finit par tomber à 0. Le satellite ne reçoit pas assez d'énergie pour recharger ses batteries entre les éclipses.

Charge : attitude caillou - consommation économique - cas pire

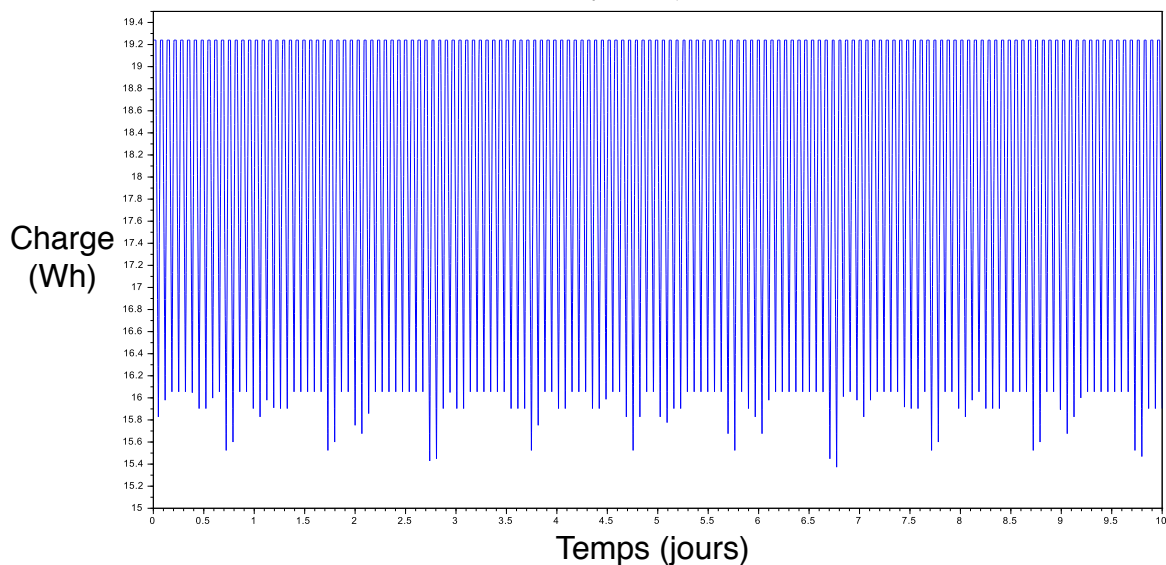


On voit que comme dans le cas précédent, la batterie se vide très rapidement, elle ne se recharge pratiquement pas entre les fréquentes éclipses.

2) Attitude survie

On commence ici par le cas pire :

Charge : attitude survie - consommation économique - cas pire



On voit en effet que même dans le cas pire, la charge de la batterie ne s'épuise jamais et il y a une faible puissance excédentaire.

On peut donc conclure que quelle que soit l'orbite parmi celles que nous considérons, le mode survie permet de recharger les batteries. Une alternance entre ce mode et le mode mission semble donc permettre de compenser le manque d'énergie rencontré dans les orbites proches du cas pire (voir l'étude de la puissance consommée).

Conclusion de l'étude

Conclusions

Nous avons vu que le satellite peut suivre plusieurs modes d'attitude et de consommation. Selon ces modes, les résultats diffèrent :

Cas Modes	Meilleur	Médian	Pire
consommation max attitude mission	viable puissance excédentaire : ++	viable puissance excédentaire : +	manque d'énergie
consommation éco attitude mission	viable puissance excédentaire : ++	viable puissance excédentaire : +	manque d'énergie
consommation éco attitude caillou	viable puissance excédentaire : +	manque d'énergie	manque d'énergie
consommation éco attitude survie	viable puissance excédentaire : ++	viable puissance excédentaire : +	viable puissance excédentaire : +

On peut voir que seul le mode survie permet la charge de la batterie dans les cas proches du cas pire. De même, seul le mode caillou permet d'atténuer les émissions de chaleur dans les cas proches du cas meilleur.

Selon l'orbite finale qu'empruntera le satellite, l'utilisation au moins partielle de ces modes permettra de maintenir la batterie chargée ou de limiter la température du satellite.

L'utilisation du mode de consommation maximal permettra également de transformer une partie de l'énergie reçue en émission, évitant de la transformer en chaleur.

En jouant sur tous ces modes, il est donc possible d'après notre étude de subvenir aux besoins du satellite dans toutes les orbites considérées.

Pistes à suivre

Pour les études futures il faudrait :

- faire une étude thermique du satellite afin de déterminer le besoin de limiter les émissions de chaleur ou non
- faire des simulations combinant les modes d'attitudes et de consommations en fonctions des paramètres du satellites mis à jour en temps réel
- affiner l'étude énergétique avec une orbite plus précise et les composants finaux

Remerciements

Natacha Combier pour le soutien durant le projet et les conseils sur Scilab

Halloin Hubert pour nous avoir aidé à comprendre les différents référentiels

Pablo pour les conseils sur la partie thermique

Aymar Quarré de Boiry, Thomas Dufour et Olivier Samin pour leur étude qui a servi de base pour notre étude