

---

# OPTIMISATION ENERGETIQUE A BORD D'UN VOILIER

---



Rapport de projet de première année – Supélec Campus de Rennes – Juin 2014

Grégoire Thillaye du Boullay

Ronan Gaillard

# INTRODUCTION

Fort de notre expérience dans la voile aussi bien légère que hauturière, nous sommes confrontés aux problèmes énergétiques à bord des voiliers. L'autonomie d'un bateau est une des problématiques les plus complexes dans ce monde, face à la multiplication des instruments de navigation électriques gourmands en énergie, mais aussi face à la hausse du confort demandé par les plaisanciers.

Ces dernières années, de nombreux progrès ont été faits sur les systèmes permettant de créer de l'énergie dite renouvelable à partir des éléments naturels (vent, courant et soleil). La démocratisation de ces derniers les rend accessible à la plupart des particuliers. Cependant, afin d'optimiser au mieux ces nouvelles sources d'énergie, il manque aujourd'hui un système simple permettant de gérer de façon automatique la charge de la batterie d'un bateau de plaisance tout en minimisant la consommation de carburant à des fins de production électrique.

# REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Monsieur Gueguen, pour son encadrement et ses conseils avisés. Tout en nous laissant libre dans nos choix, il a réussi à cerner nos problèmes et à nous accompagner dans leur résolution. Son intérêt pour le projet nous a aidés à avancer.

Merci à l'association Gouélec, et à son bureau, qui nous a fait partager son expérience nautique et permis d'affiner nos choix techniques.

# TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION .....	2
REMERCIEMENTS.....	3
PRESENTATION DU MODELE .....	5
Equipement .....	5
BASES DE NOTRE MODELISATION .....	6
LES SOURCES D'ENERGIE .....	6
Aérogénérateur .....	6
Les panneaux solaires.....	7
Le moteur thermique .....	8
LA BATTERIE.....	10
LES CHARGES .....	11
Lumières intérieures.....	11
Feux de navigation.....	12
Pilote Automatique .....	12
Instruments de navigation.....	13
Réfrigérateur .....	13
SIMULATION .....	15
Finalisation du modèle avec simulink.....	15
Routage .....	17
Première simulation .....	18
Définition des règles d'optimisation du contrôleur .....	20
Définition des états .....	21
Modification des systemes .....	22
CONCLUSION .....	27
ANNEXES.....	28
Annexe A.....	28
Annexe B.....	28
SOURCES.....	30

# PRESENTATION DU MODELE

Afin de cadrer notre étude nous avons défini un voilier dont les caractéristiques sont listées ci-dessous :

- Taille : 30 pieds (9,14 mètres)
- Utilisation : croisière rapide ; un voilier qui se veut donc confortable, mais aussi rapide et surtout autonome

## EQUIPEMENT

- Batterie 12V 75 Ah
- Eolienne 200W
- Panneau Solaire
- Réfrigérateur/Glacière de 40W
- Lumières intérieures de 100W
- Feux de navigation à LED de 2,4W avec rétroéclairage de compas de 0,2 W
- Moteur diesel de 20 chevaux avec un réservoir de 60 L
- Pilote automatique de 60 W

Le choix de ces équipements a été établi d'après nos expériences personnelles, et ont été affinés à l'aide du Guide des Glénans qui regroupe les différents appareils disponibles à bord d'un voilier de croisière ainsi que leur consommation respective. Ces équipements nous semblent être l'équipement le plus commun sur un voilier de course croisière de 30 pieds. Ainsi notre modèle sera le plus universel possible. Certains équipements tels que la pompe à eau douce ne nous ont pas semblé utile d'être modélisés car ils participaient à moins d'1% de la consommation totale ce qui, au vu des approximations faites après, est négligeable.

Enfin le choix de la modélisation des divers équipements, ainsi que leur consommation et durée d'utilisation quotidienne sera détaillé et précisé dans la prochaine partie. L'ensemble des sources, charges, et autres équipements ont été modélisés puis simulés à l'aide de l'outil Simulink de MATLAB.

# BASES DE NOTRE MODELISATION

Nous avons choisi Matlab ainsi que Simulink pour réaliser nos simulations et tests. Déjà utilisés en début d'année ces deux logiciels nous semblaient très pertinents pour ce que nous voulions réaliser.

Notre modèle comportera différents blocs : chaque bloc correspondra à un équipement. Les blocs de sources d'énergie comporteront obligatoirement une sortie « *puissance produite* » qui sera reliée au bloc batterie pour la recharger. A l'inverse les charges comporteront un entrée obligatoire « *activé* » qui permettra au futur contrôleur d'activer les blocs et de les faire changer de mode (haute consommation, normal, économie d'énergie...), et une sortie obligatoire « *puissance consommée* » qui sera aussi reliée au bloc batterie afin de débiter cette dernière.

Afin de permettre une utilisation la plus universelle possible, les constantes se rapportant aux différents équipements (rendements, puissance, etc...) peuvent être modifiées facilement à l'aide d'un script de configuration.

## LES SOURCES D'ENERGIE

### L'AEROGENERATEUR

Sur ce type de bateau il est commun de trouver des éoliennes pour augmenter l'autonomie. Notre choix s'est porté sur une éolienne de 200 Watts qui sont les plus vendues.

Les aérogénérateurs, ou plus communément éoliennes, sont des systèmes générant de l'électricité à partir de la force du vent. Ce dernier fait tourner des pales qui entraînent un aimant tournant ou un électro aimant. Les aérogénérateurs à axe horizontal, qui imposent moins de contraintes physiques au pont du bateau, sont privilégiés en nautisme. Il existe actuellement beaucoup de systèmes différents sur le marché. En fonction du système choisi, les rendements peuvent différer énormément. Globalement, la plupart des appareils fonctionnent entre 5-10 nds et 30-40nds de vent. Le courant produit est faible et dépend de la force du vent. En fonction des conditions météorologiques, on peut compter une production de 10 à 20 Ah par jour.

La puissance d'une éolienne est égale à

$$P = \frac{1}{2} m_0 S V^3$$

*ou  $m_0$  est la masse volumique de l'air  
 $S$  est la surface de l'éolienne  
 $V$  la vitesse du vent*

On remarque qu'elle est proportionnelle au cube de la vitesse du vent et augmente donc considérablement lors que cette dernière augmente.

Le théorème de Betz indique que l'énergie électrique récupérée, après transformation est au maximum égal à 0,60P.

On en déduit Pmax :

$$P_{max} = 0,37 S V^3$$

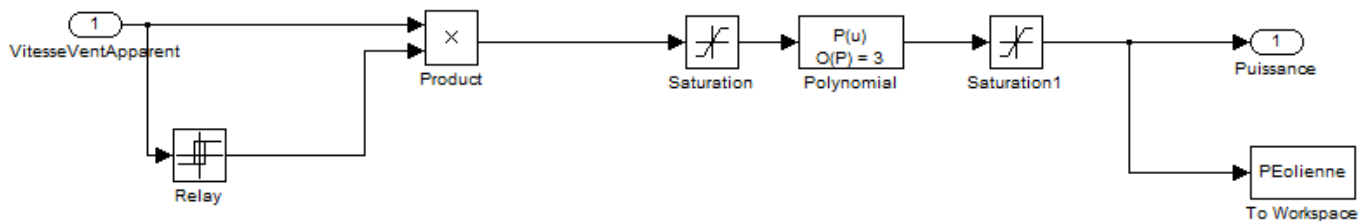
*Pmax est la puissance maximum récupérable en watts  
 $S$  la surface de l'éolienne et  $V$  la vitesse du vent.*

A noter qu'aujourd'hui, les meilleures éoliennes ont un rendement de 70%.

Cependant le rendement dépend de la vitesse du vent, nous avons donc trouvé [4] une modélisation polynomiale de la puissance électrique produite en fonction de la vitesse du vent. Il est important de noter que la vitesse qui nous importe est la vitesse du vent dans le référentiel du bateau, c'est-à-dire le vent apparent.

La relation entre la vitesse du vent et la puissance produite est :

$$P(v) = 0,3073v^3 - 2,2158v^2 + 4,0379v - 1,2755$$



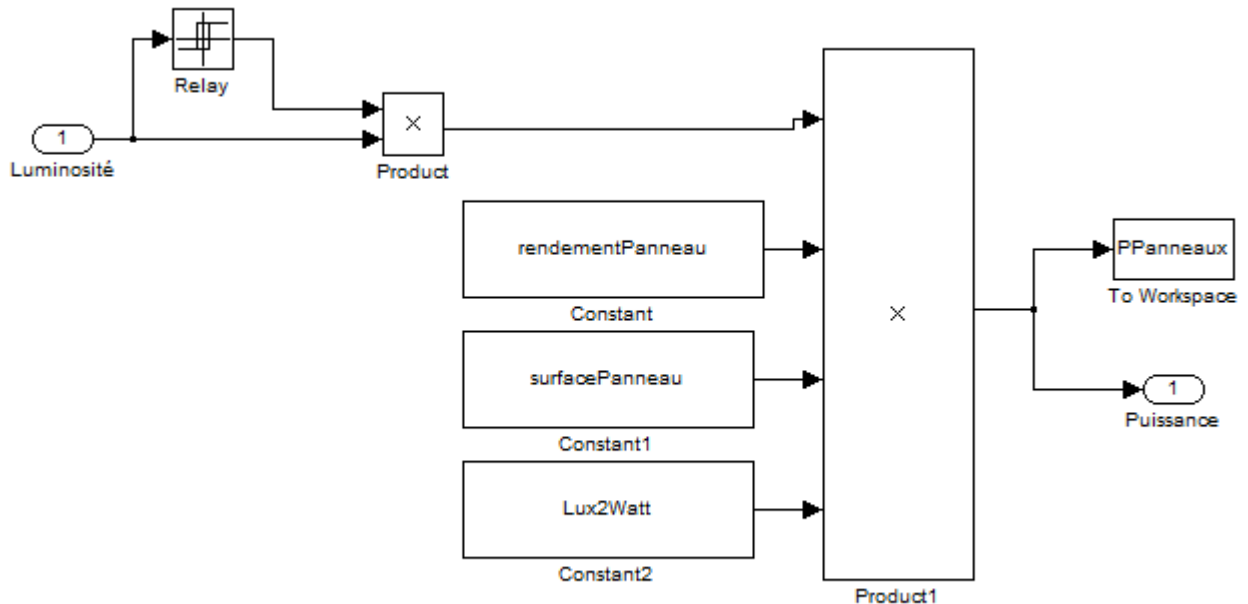
Notre modélisation d'une éolienne sur Simulink prend en entrée la valeur du vent apparent, et calcule la puissance résultante. Un bloc de saturation permet de limiter le fonctionnement de l'éolienne lorsque le vent n'est pas assez fort, ou trop fort. Le second bloc de saturation permet de limiter la puissance délivrée par l'éolienne à 200W.

## LES PANNEAUX SOLAIRES

Le nombre de technologies et types de panneaux solaires disponibles sur le marché en ont fait un des équipements les plus difficiles à modéliser. De plus le nombre important de paramètres influençant sur le rendement (inclinaison du soleil, inclinaison du voilier, présence plus ou moins importante de nuages, ombre des différentes voiles sur une partie des panneaux, présence ou non d'eau sur les panneaux, évolution de la température,...) à prendre en compte nous ont contraint à réaliser un modèle extrêmement simple. Dans ce modèle les panneaux sont actifs à partir d'une certaine luminosité, et la puissance produite est proportionnelle à la surface des panneaux et à un rendement constant.

Au vu de notre expérience nous avons choisi d'équiper notre voilier de panneaux d'une surface totale d'un mètre carré. Si nous considérons que l'angle moyen d'incidence des rayons est de 50 degrés, et que la présence de l'ombre des voiles peut masquer en moyenne 50% de la surface des panneaux on peut espérer avoir un rendement moyen de 35%. [1]

Pour finir le modèle nous avons créé un modèle de soleil dont la luminosité évolue au fil du temps, de 0 lux la nuit à 80000 lux quand le soleil est au zénith. [2] Puis nous convertissons les lux en Watts par mètres carrés en les multipliant par le coefficient 0,0015.



Voici ci-dessus le modèle du panneau solaire sous simulink. Le *relay* permet d'imposer un minimum de luminosité avant que le panneau ne soit actif. Le modèle du soleil peut-être retrouvé en annexe.

## LE MOTEUR THERMIQUE

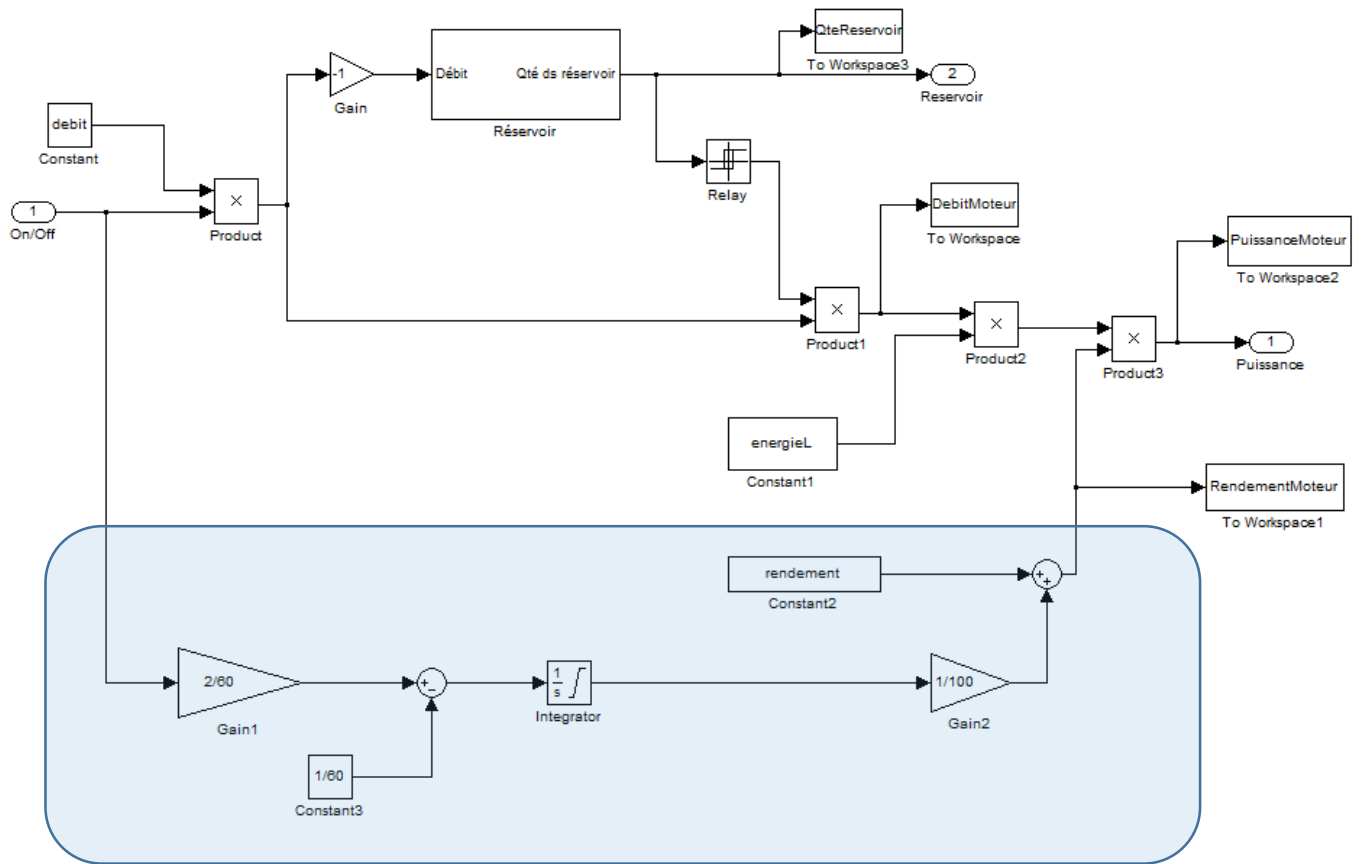
Notre choix s'est porté, en vue de la taille du bateau, vers un moteur diesel de 20 chevaux. C'est ce qu'il y a de plus courant sur ce type de bateaux. Le moteur assure à la fois la propulsion en cas de vent trop faible ou en navigation dans le port mais aussi la génération d'électricité à l'aide d'un alternateur. La rotation de l'arbre du moteur (débrayé) entraînant une bobine et la création d'un courant.

Notre modèle de moteur se décompose en deux parties : un réservoir, et un adaptateur d'énergie.

Le réservoir est un intégrateur, avec deux limites (0 et 60 litres). Il intègre le débit consommé par l'adaptateur d'énergie, qui fait diminuer le niveau de carburant. Notre moteur produit toujours la même puissance car nous considérons qu'il fonctionne toujours avec le meilleur rendement possible grâce à un asservissement qu'on ne détaillera pas. Afin d'obtenir la puissance produite, nous appliquons au débit une puissance par litre consommée (40MJ/L pour le gasoil) [3], un rendement (30%) et nous obtenons la puissance délivrée. Afin de rendre compte de l'augmentation du rendement lorsque le moteur est 'chaud', nous avons ajouté un sous-système qui augmente le rendement lorsque le moteur est allumé, et le diminue si ce dernier est éteint : le rendement 'à froid' est de 10%, au bout de cinq minutes d'activité le rendement monte à 30%. De même à l'arrêt le rendement redescend à 10% au bout de cinq minutes d'inactivité.



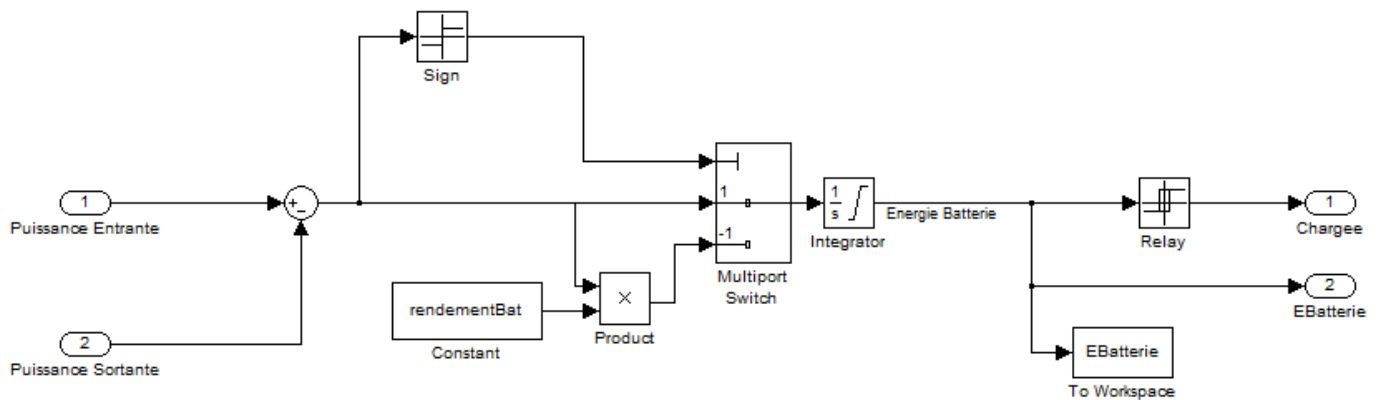
Voici le modèle Simulink de notre moteur thermique. Dans la partie haute nous avons la partie conversion énergie thermique vers électrique, et dans la partie basse, encadré en bleu, la gestion de l'évolution du rendement du moteur.



# LA BATTERIE

Les voiliers actuels de cette taille disposent le plus souvent d'une voire de deux batteries de 150Ah (sans compter la batterie du démarreur). Afin de pouvoir optimiser ensuite la consommation nous avons choisi de limiter la taille de la batterie et ainsi d'embarquer une seule batterie de 75Ah.

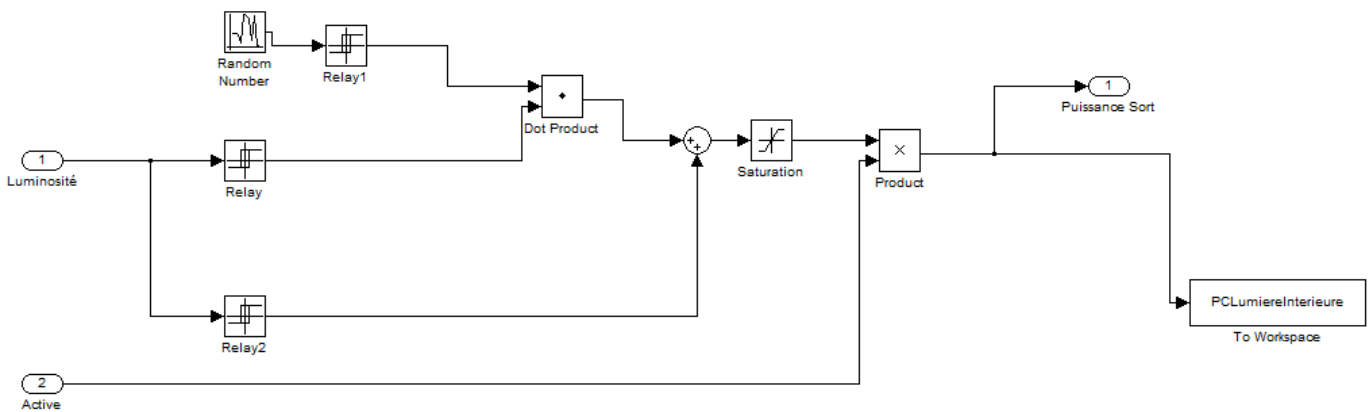
Nous avons décidé de réaliser un modèle simplifié et abstrait où la batterie est constituée principalement d'un intégrateur qui intègre la différence entre puissance sortante et entrante afin de mémoriser la quantité d'énergie contenue dans la batterie. Si la batterie débite ( Puissance Entrante – Puissance Sortante est négatif) on applique un rendement de stockage égal à 90%, qui correspond aux pertes lors du stockage de l'énergie.



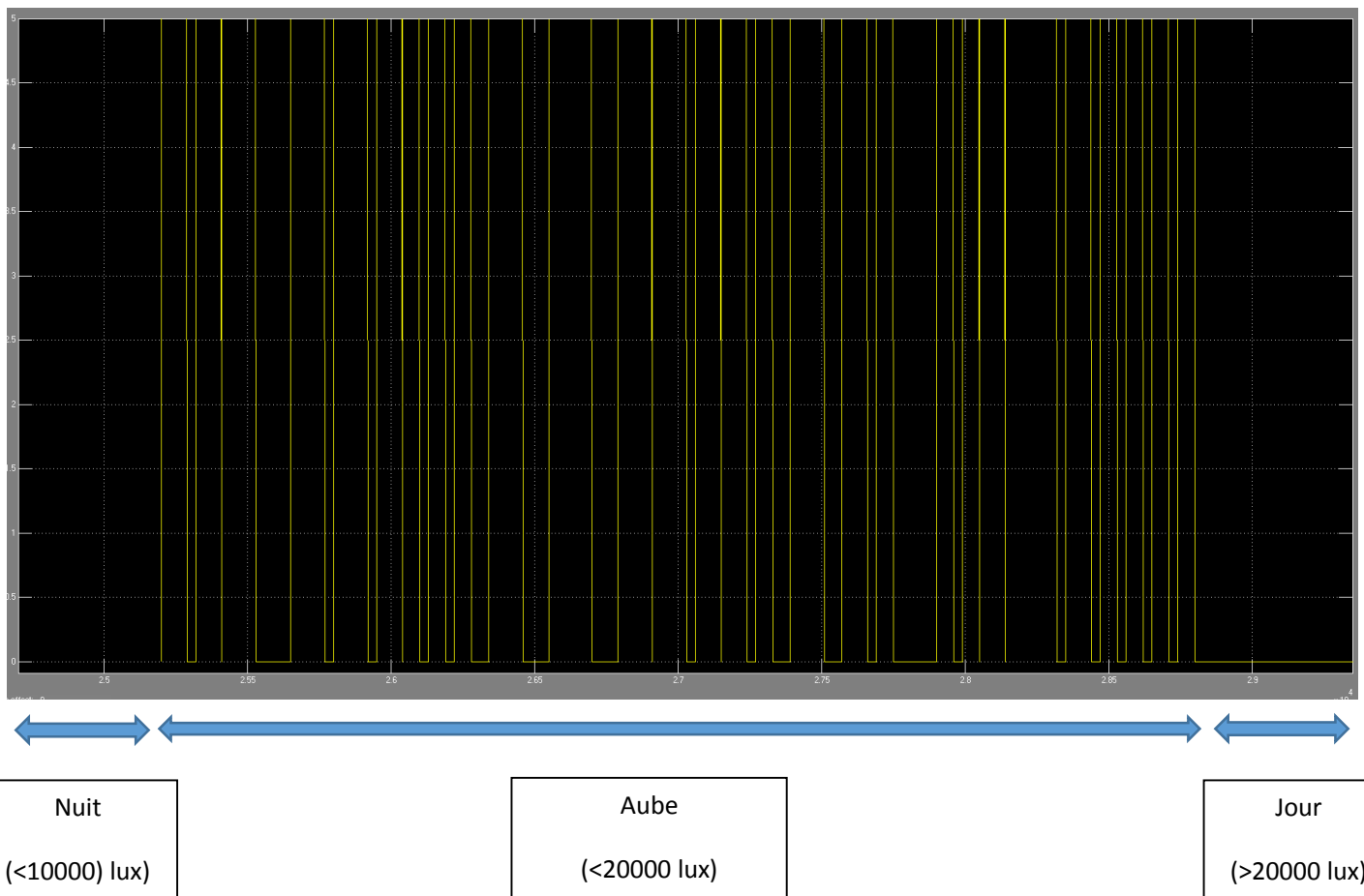
# LES CHARGES

## LUMIERES INTERIEURES

Les lumières intérieures sont aussi bien destinées à la sécurité qu'au confort. Avec le guide des Glénans [5] nous avons estimé la puissance lumineuse intérieure à 100W. La consommation électrique des sources lumineuses dépendant de la luminosité, nous avons décidé de prendre en considération 3 situations différentes lorsqu'il fait jour (luminosité extérieure supérieure à 20000 lux), les lampes sont éteintes, lorsqu'il fait sombre (luminosité comprise entre 10000 lux et 20000 lux) les lampes sont allumées aléatoirement afin de rendre compte de l'utilisation humaine, et enfin, lors qu'il fait nuit, les lampes sont considérées comme allumées en permanence.



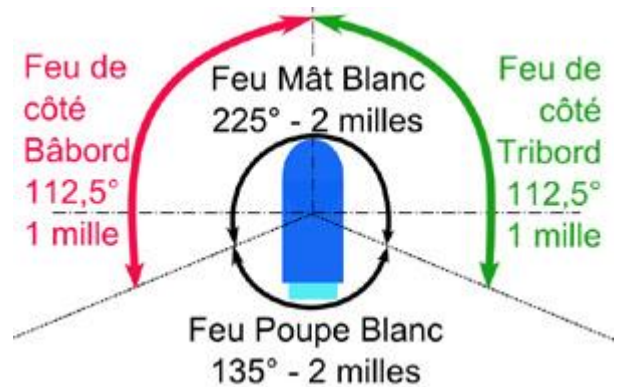
Le nombre aléatoire permet de simuler cette intervention humaine lorsqu'il fait sombre. Et les *relays* permettent de contrôler l'allumage des lampes en fonction de la luminosité externe. Voici la puissance consommée par les lumières intérieures en fonction de l'avancement dans la journée :



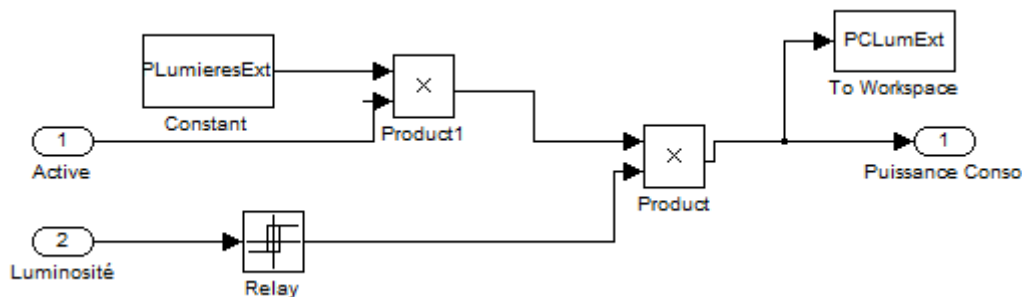
## FEUX DE NAVIGATION

Obligatoire sur tout navire navigant de nuit, les feux de navigation sont un outil essentiel de sécurité. Ils permettent au bateau d'être vu de nuit ou lorsque la visibilité est réduite.

Nous avons équipé notre bateau de feux de navigation à LED d'une consommation réduite de 2,4 Watts. Nous avons aussi considéré que lorsque les feux de navigation s'allumaient le rétroéclairage des instruments de navigation extérieurs, comme le rétroéclairage du compas, s'allumaient aussi. La consommation du rétroéclairage a été définie à 0,2 Watts. Ces valeurs numériques ont été choisies à l'aide du Guide des Glénans [5].



Enfin nous considérons qu'il est prudent d'allumer les feux de navigation lorsque la luminosité descend en dessous de 20000 lux.

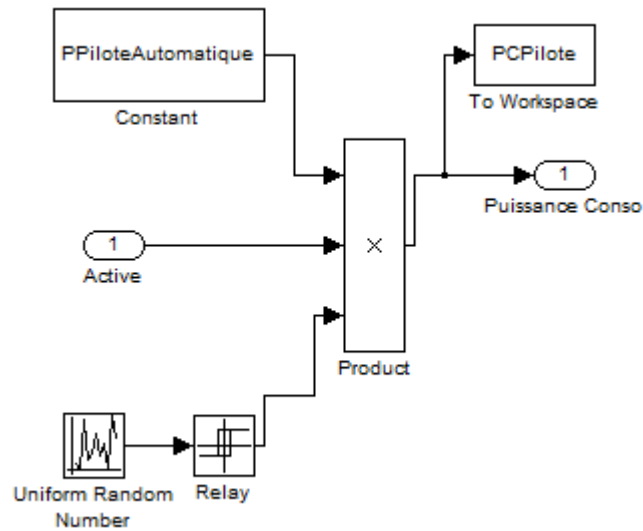


Le *relay* permet d'activer les feux lorsque la luminosité extérieure descend en dessous de 20000lux.

## PILOTE AUTOMATIQUE

Le pilote automatique est un système qui agit sur la barre, et permet ainsi à l'aide d'un compas numérique de maintenir un cap constant. L'intérêt d'un tel dispositif est de permettre au navigateur de plus avoir à s'occuper en permanence de la barre et de pouvoir dormir, cuisiner ou encore étudier la route à suivre.

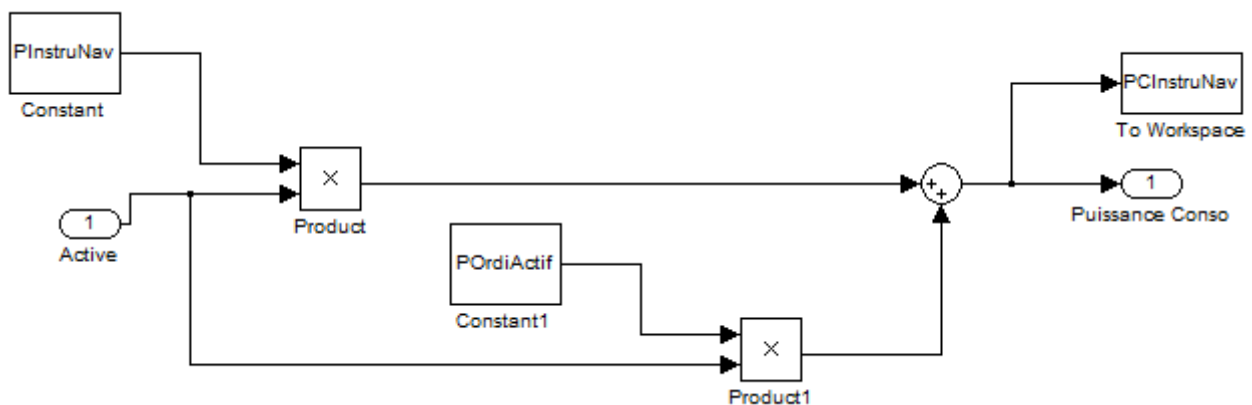
Un tel dispositif consomme en moyenne 60 Watts d'après le guide des Glénans [5], et d'après notre expérience peut être utilisé jusqu'à 20 heures par jour.



Dans ce modèle la génération de nombre aléatoire à l'aide du relay permet de simuler une utilisation aléatoire du pilote automatique avec une moyenne de 20 heures par jour.

## INSTRUMENTS DE NAVIGATION

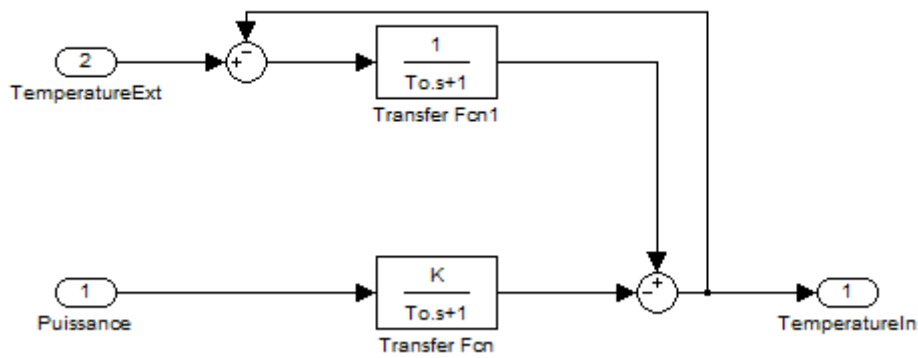
Les instruments de navigation sont essentiels à bord. Avec la progression des nouvelles technologies ceux-ci deviennent électriques et impactent donc sur la consommation à bord. Notre équipement se compose d'un ordinateur, souvent utilisé pour faire du routage et ainsi optimiser sa route, d'une consommation de 60 Watts lorsqu'il est actif, et de 10 Watts en veille, ainsi que d'une girouette (2,6 Watts), d'une VHF (3,6 Watts), et d'un GPS (1,5 Watts).



## REFRIGERATEUR

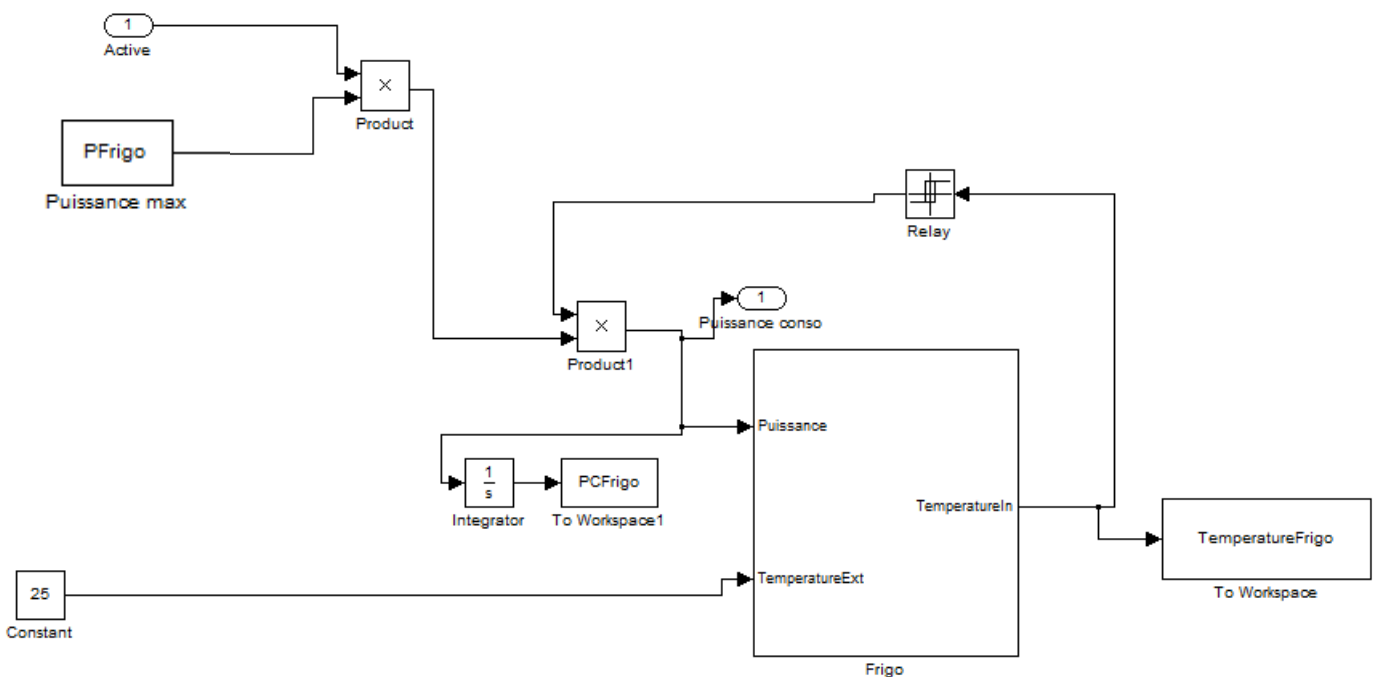
Élément indispensable à la conservation des denrées alimentaires fraîches tel que des bières, le réfrigérateur reste tout de même un équipement de confort gourmand. Le modèle que nous avons choisi consomme 40 Watts. Devant la difficulté de trouver des valeurs numériques pour les échanges calorifiques entre l'intérieur du réfrigérateur et l'extérieur et le compresseur nous nous sommes basés sur des observations. Dans un réfrigérateur embarqué de 40 Watts la température met 24 heures pour passer de 25 degrés à 6 degrés.

Les échanges calorifiques sont donc modélisés par ce schéma bloc :

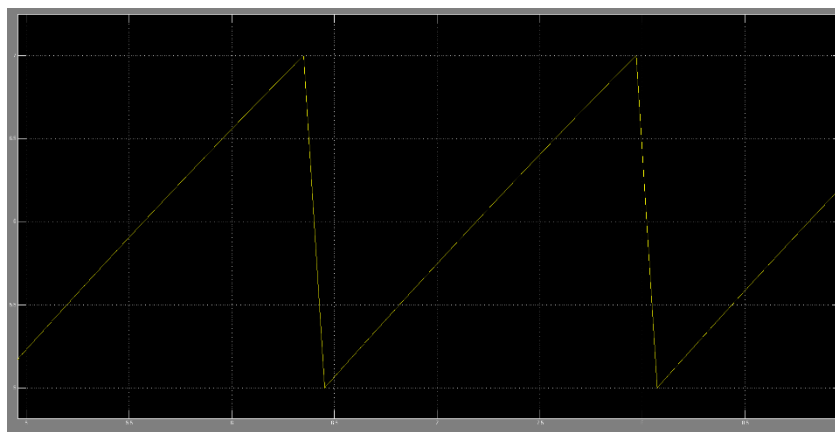


Les constantes des fonctions de transfert ont été adaptées en fonction des observations réalisées dans la réalité.

L'asservissement du réfrigérateur se fait de la manière suivante : lorsque la température interne est supérieure à 7 degrés Celsius le compresseur se met en marche, le réfrigérateur consomme alors 40 Watts. Lorsque la température interne descend en-dessous des 5 degrés Celsius le compresseur s'arrête et le réfrigérateur ne consomme plus. Cet asservissement est réalisé par le schéma bloc suivant :



Le relay permet d'activer ou non le compresseur en fonction de la température interne. On peut observer l'évolution de la température dans le réfrigérateur :

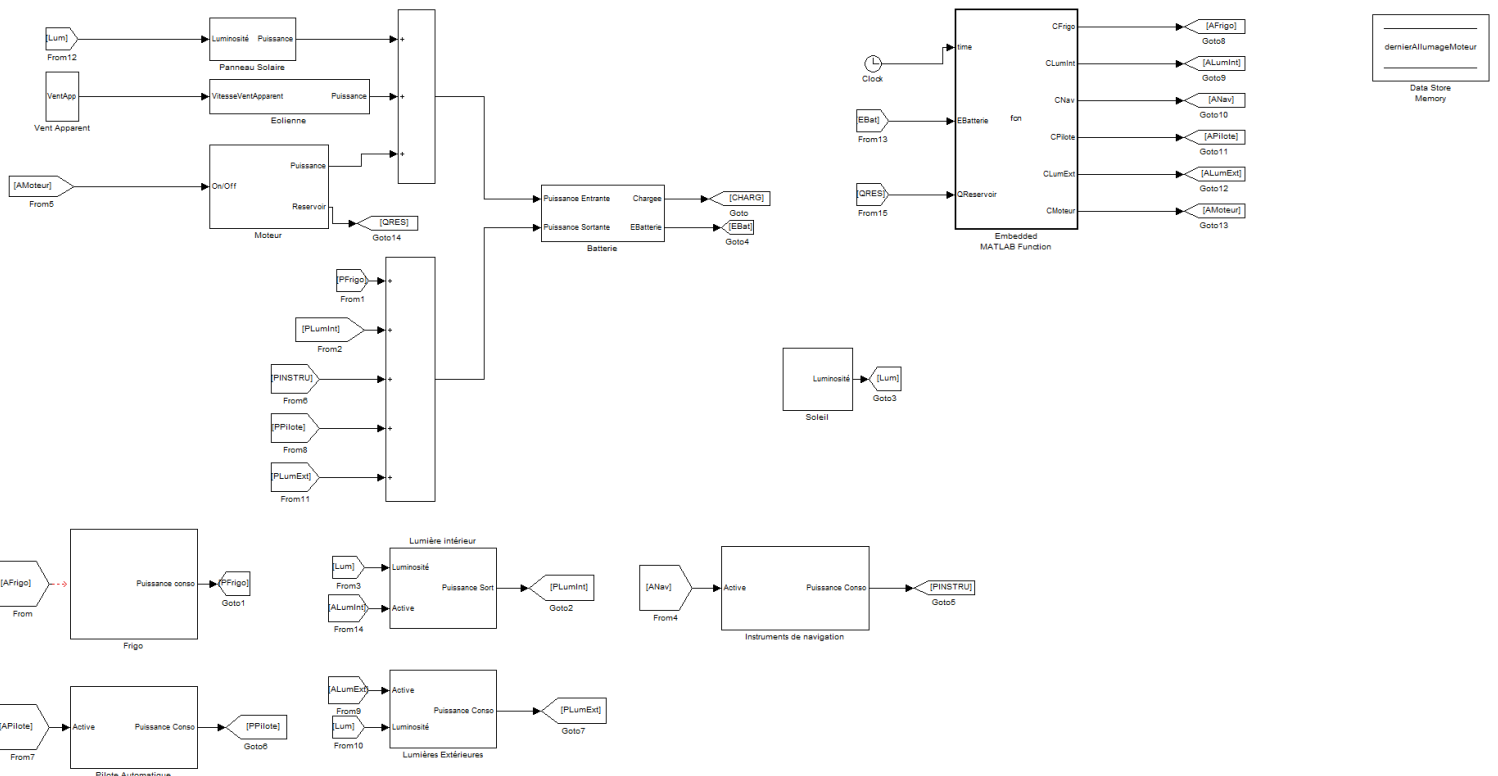


# SIMULATION

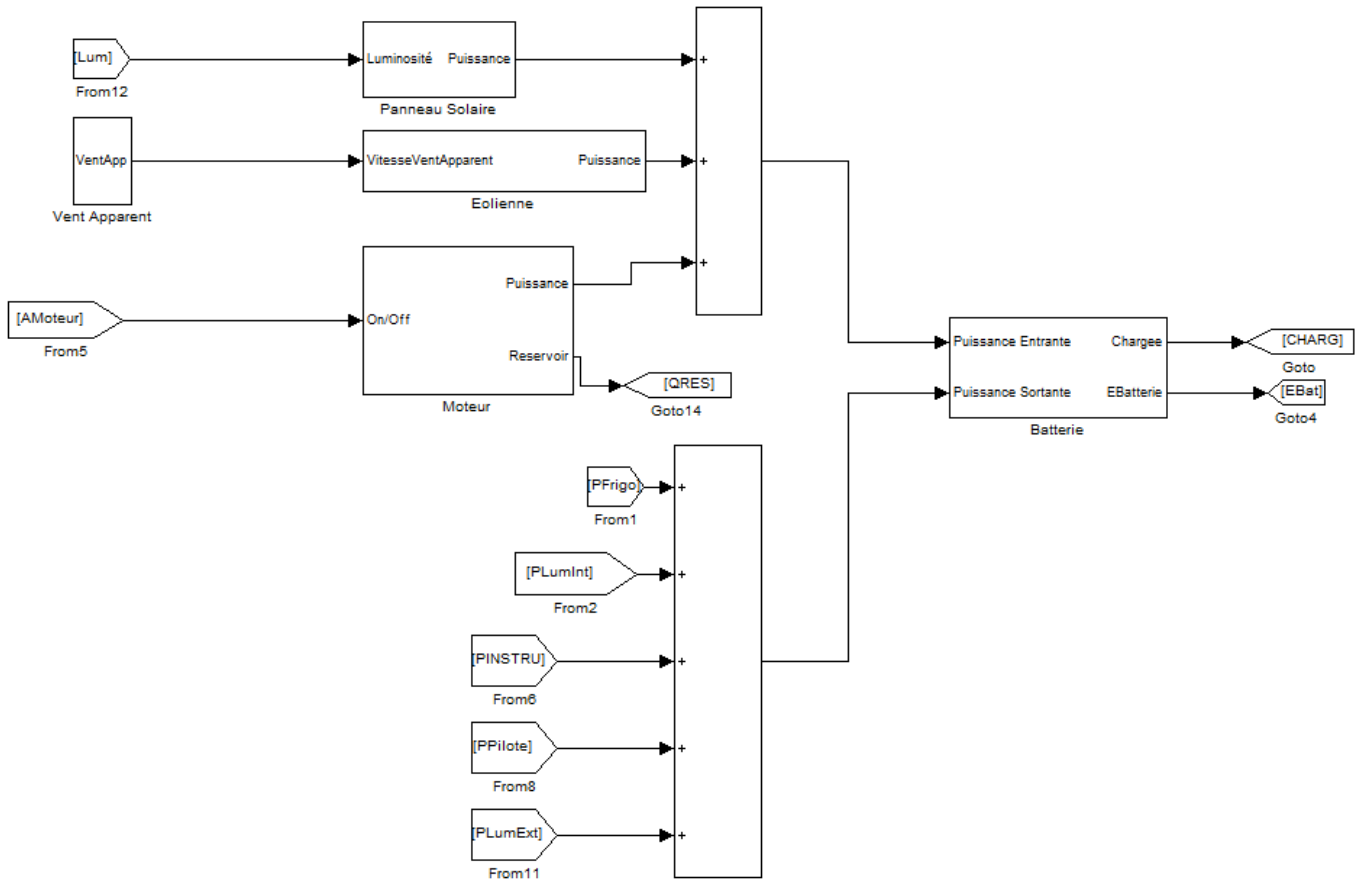
## FINALISATION DU MODELE AVEC SIMULINK

Nous avons réalisé un script disponible en annexe B qui permet de charger toutes nos constantes dans l'environnement Matlab et d'importer les données de navigation que nous verrons par la suite. Ce script permet d'automatiser la simulation et de modifier les paramètres le plus simplement possible.

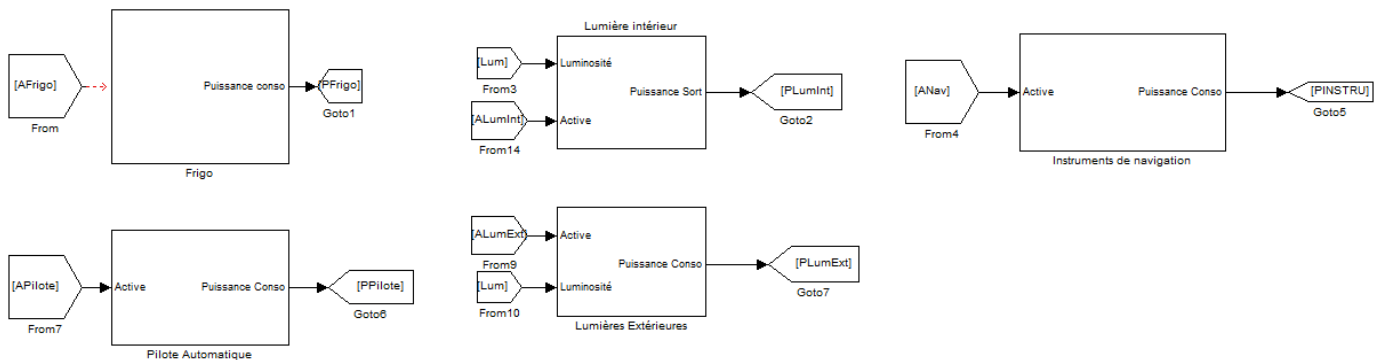
Sous Simulink nous avons regroupés tous nos blocs dans un projet où nous avons connecté tous ces blocs afin de créer notre modèle final :



Ci-dessous nous zoomons sur chaque partie pour en détailler le fonctionnement :

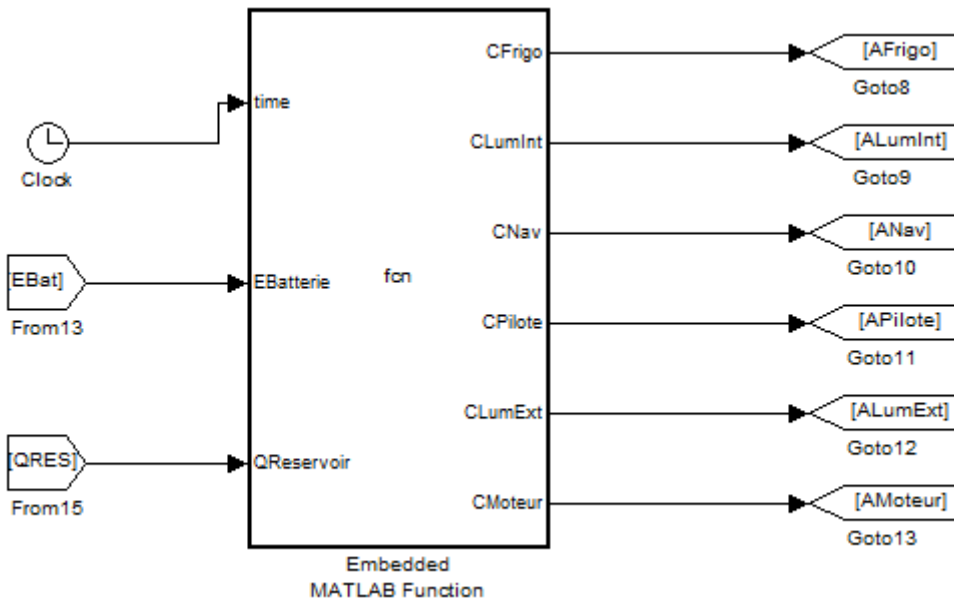


Ici nous regroupons les puissances consommées ainsi que les puissances produites que nous connectons à la batterie.



Voici toutes les charges connectées au contrôleur (ci-dessous) et à la batterie.





Voici le contrôleur qui prend en entrée l'état de charge de la batterie, la quantité d'essence restante dans le réservoir et qui commande les différentes charges de notre voilier.

## ROUTAGE

Afin d'obtenir des données de navigation (direction du bateau, vitesse du bateau, vitesse et direction du vent apparent, durée du trajet, position du bateau, ...) nous avons décidé d'utiliser un logiciel de routage, qui à partir de fichier météo donne la route optimale pour rejoindre deux coordonnées en voilier. Notre choix s'est porté vers le logiciel qtVlm, logiciel open source qui permet ce routage. Les fichiers météo permettant le routage ne dépassant pas les quatre jours nous avons donc décidé d'effectuer notre simulation sur cette durée. Nous allons donc simuler une navigation entre le Finistère et le sud du Portugal.



Le logiciel calcule alors la route optimale en fonction de la météo (vitesse et direction du vent), et nous permet ensuite d'extraire les données du voyage vers un fichier au format Excel. Ce dernier sera chargé en même temps que nos variables dans notre script.

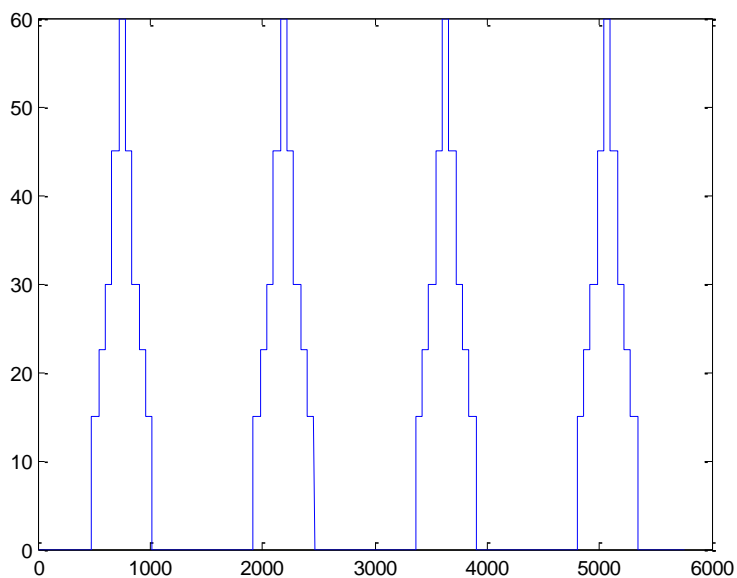
## PREMIERE SIMULATION

Afin de tester notre modèle nous avons réalisé une première simulation. Le contrôleur active le moteur lorsque la batterie descend en dessous de 20% de charge. Cela permet de voir la consommation de gazole au cours du trajet sans composant intelligent à bord du voilier.

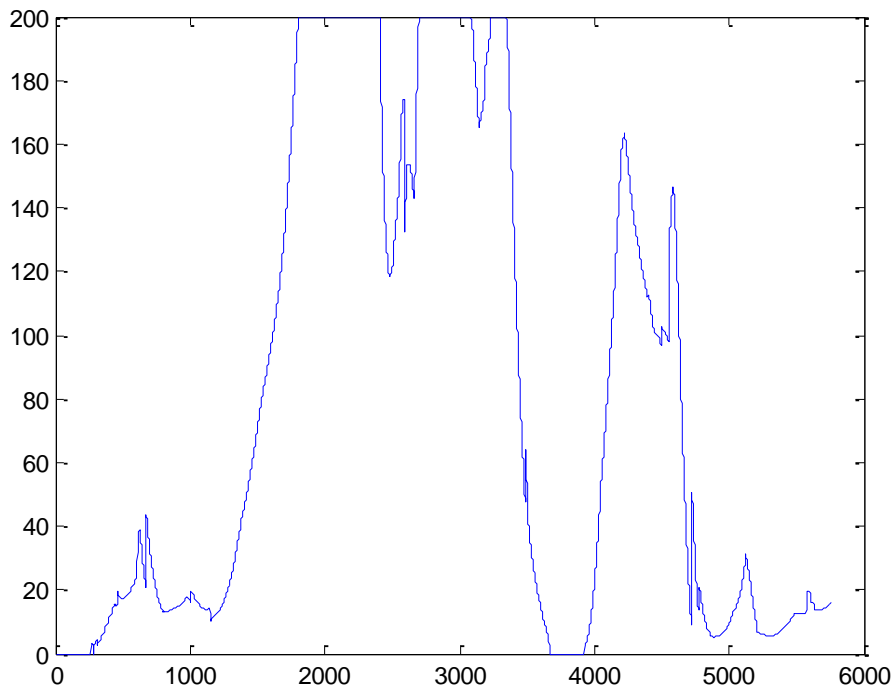
A la fin de la simulation, grâce à un deuxième script, nous récupérons la quantité de gazole restante la fin du voyage :

```
Quantité de gazole restante :  
51.7440
```

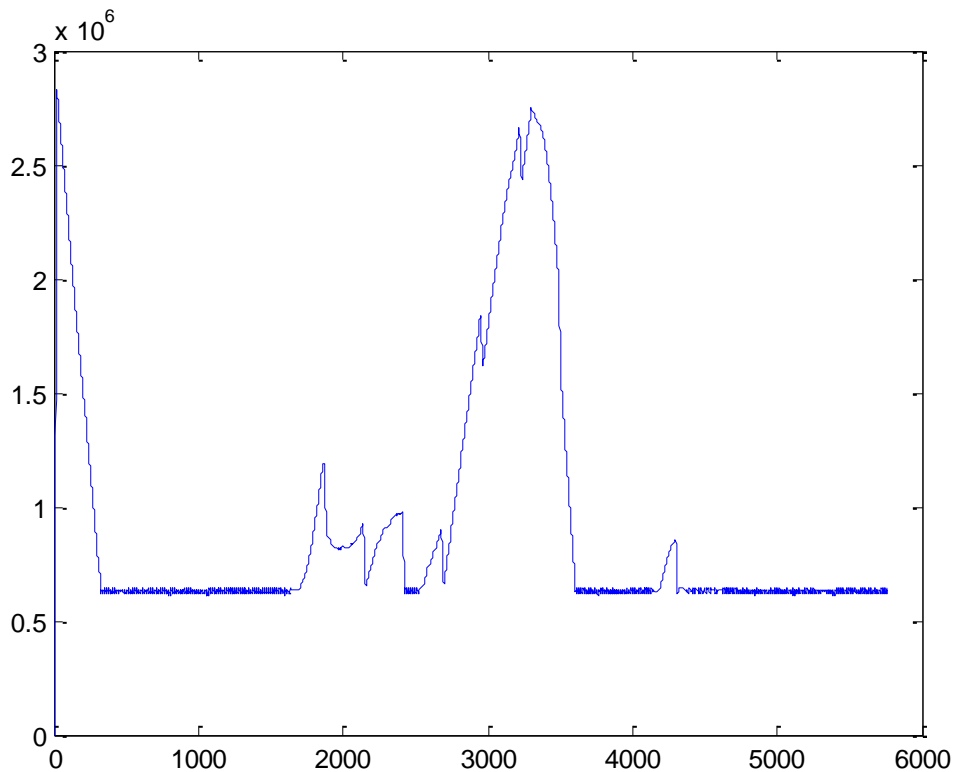
De plus nous obtenons d'autres résultats qui permettent de vérifier le bon fonctionnement du système :



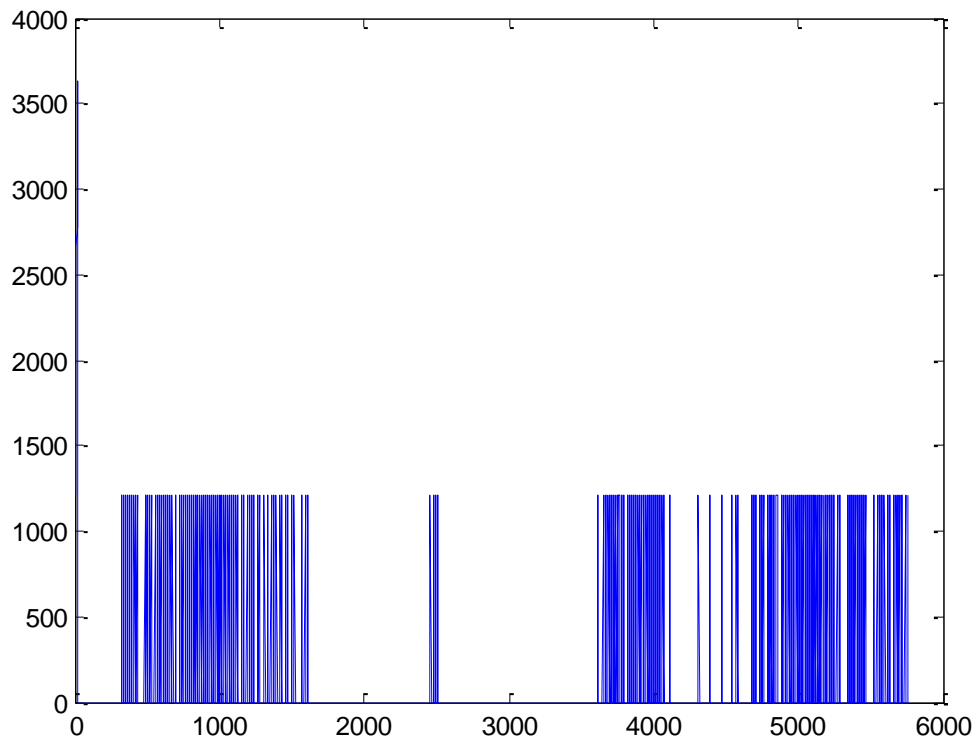
Ci-dessus, la production d'énergie par les panneaux solaires, on observe bien une production quotidienne sur les quatre jours de navigation.



Ci-dessus, la production d'énergie liée à l'éolienne, les pics de production correspondent bien aux pics de vitesse du vent.



Ci-dessus, la charge de la batterie. On remarque que le niveau de charge est souvent légèrement au-dessus de 20%. Ce qui suppose que le moteur s'allume fréquemment pour maintenir la batterie au-dessus de 20%, ainsi le moteur fonctionne souvent à un rendement très faible.



Ci-dessus on observe le graphe de production d'énergie du moteur. Ceci confirme l'hypothèse précédente : le moteur s'allume et s'éteint quand la batterie est à un niveau de charge avoisinant les 20%. Ceci oblige le moteur à fonctionner à rendement très faible et ainsi gaspille énormément d'énergie.

Ayant obtenus ces premiers résultats nous avons maintenant une idée de l'évolution de la consommation à bord d'un voilier. Notre but est maintenant d'implémenter un contrôleur intelligent qui minimise voire annule la consommation de gazole. Ensuite nous essayerons d'implémenter différentes versions de ce contrôleur afin qu'il optimise la charge de la batterie lorsque le voilier ne comporte pas soit d'éolienne, soit aucun panneau solaire ou encore aucun moteur.

Nous nous sommes aussi rendu compte que nous pouvons avoir des batteries pleines, et de l'énergie produite en surplus qui est perdue alors que notre réfrigérateur n'est pas à sa température minimale. Nous avons modifié le système afin que le réfrigérateur se maintienne à 5°C lorsque la batterie est chargée à plus de 99%. En effet, l'inertie du réfrigérateur va nous permettre de stocker de l'énergie en retardant au maximum l'allumage du réfrigérateur.

## DEFINITION DES REGLES D'OPTIMISATION DU CONTROLEUR

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés aux différentes charges qui nous semblaient obligatoires. Par exemple, il est inconcevable que nous nous retrouvions avec une énergie trop faible pour allumer les appareils de navigations, mais il est tout à fait possible de se passer des lumières du pont.

Les équipements obligatoires sont les feux de navigation et les appareils de navigations. Le pilote automatique apportant une véritable sécurité, il nous semble important qu'il fonctionne jusqu'à l'apparition d'une situation 'd'urgence'. Les lumières intérieures peuvent être allumés moins régulièrement en période de luminosité faible, et nous pouvons facilement nous passer d'une partie d'entre elles (et donc réduire leur puissance consommée). Enfin, nous considérons le réfrigérateur comme non indispensable au bon fonctionnement du bateau.

Nous avons créé un mode économique pour 3 charges différentes :

- Les lumières intérieures peuvent limiter leur consommation à 50W.
- Le réfrigérateur peut augmenter sa température de consigne de 2°C, afin de s'allumer seulement lorsque sa température intérieure est supérieure à 10°C, et s'éteindre lorsque la température descend en dessous des 8°C.
- Les appareils de navigation, et plus particulièrement le PC peuvent passer en mode économique et donc diviser par 6 sa consommation (nouvelle consommation = 10W)

Afin de modéliser ces changements d'états via Simulink, nous utilisons des *Multiport Switch*. En mettant dans le port de commande l'état de notre système (3 différents expliqués ci-dessous), le système prendra automatiquement en compte le fonctionnement du système voulu.

## DEFINITION DES ETATS

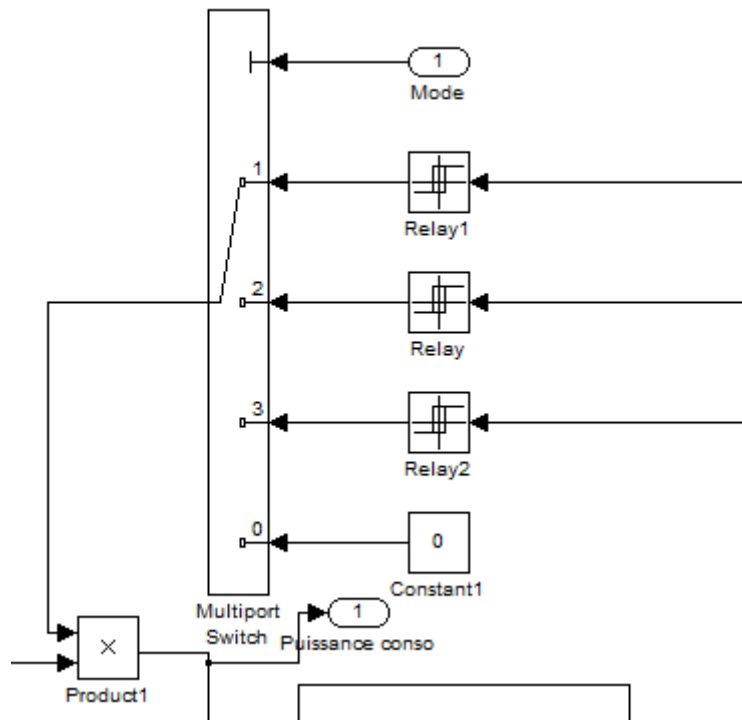
L'état 1 est défini comme l'état de fonctionnement normal. Les différents outils fonctionnent comme défini au début de l'étude.

L'état 2 est le mode économique. Il s'active lorsque l'état de charge de la batterie descend en dessous des 40% (valeur que nous ferons varier par la suite). La puissance des lumières intérieures est limitée et la température de consigne du réfrigérateur passe à 9°C (allumage lorsque  $T > 10^\circ\text{C}$  et s'éteint lorsque la température redescend en dessous de 8°C).

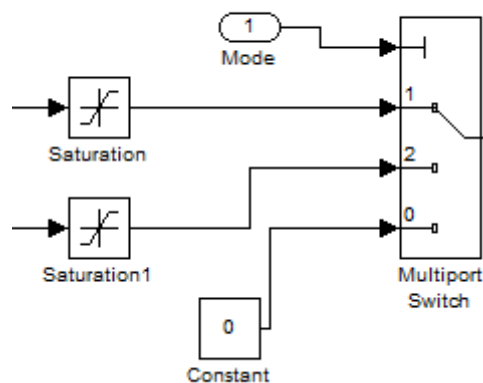
L'état 0 correspond au mode de secours (Pourcentage de charge de la batterie inférieur à 25% (valeur aussi modifiée par la suite). Le réfrigérateur, ainsi que les lampes et le pilote automatique sont éteints. Le PC reste en mode économique.

## MODIFICATION DES SYSTEMES

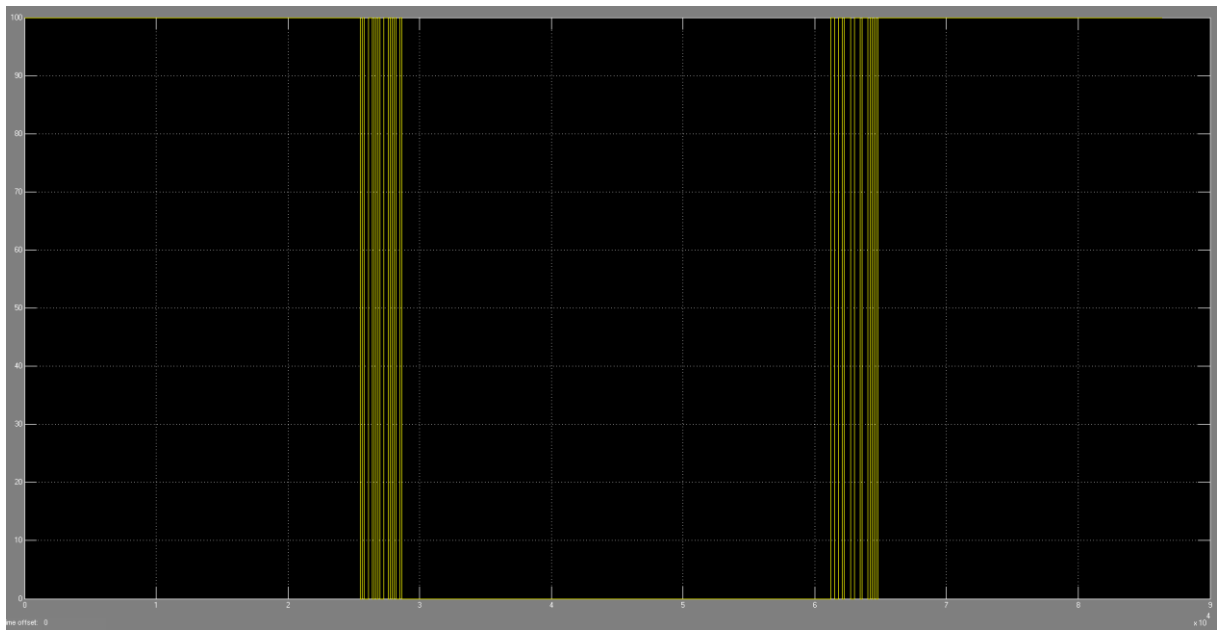
Afin de pouvoir contrôler les systèmes depuis notre contrôleur, c'est-à-dire passer en mode économique, normal ou secours, nous avons dû modifier nos modélisations.



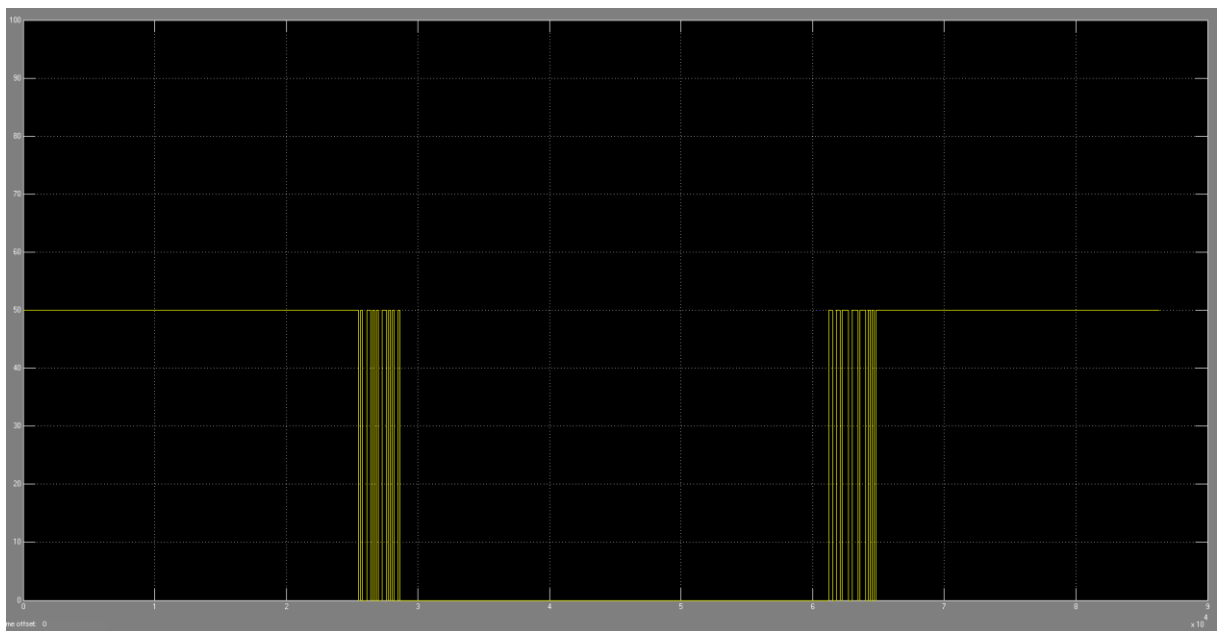
Modification de la température de consigne du réfrigérateur à l'aide d'un multiport switch



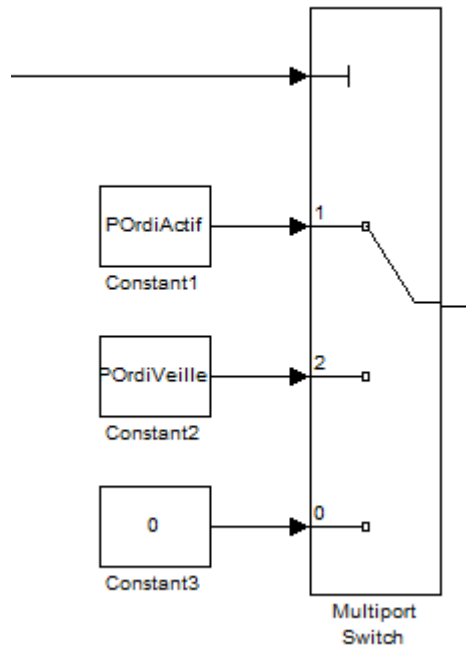
Modification de la puissance maximale consommée par les lumières intérieures à l'aide d'un multiport switch



Consommation des lampes sur une journée en mode normal



Consommation des lampes sur une journée en mode économique



Possibilité pour le PC de passer en mode veille à l'aide d'un multiportswitch

Le contrôleur est géré par le code disponible en Annexe, tout le fonctionnement repose sur ces quatre variables :

```
%controleur
pourcentageBas = 35; %pourcentage à partir duquel certains appareils se mettent en mode secours (=s'éteignent)
pourcentageHaut = 80; %pourcentage de charge au-dessus duquel les appareils fonctionnent normalement
pourcentageArretMoteur = 40; %pourcentage maximum au-dessus duquel le moteur n'a plus besoin de charger la batterie
pourcentageDemarrageMoteur = 20; %pourcentage critique à partir duquel il faut allumer le moteur pour recharger les batteries
```

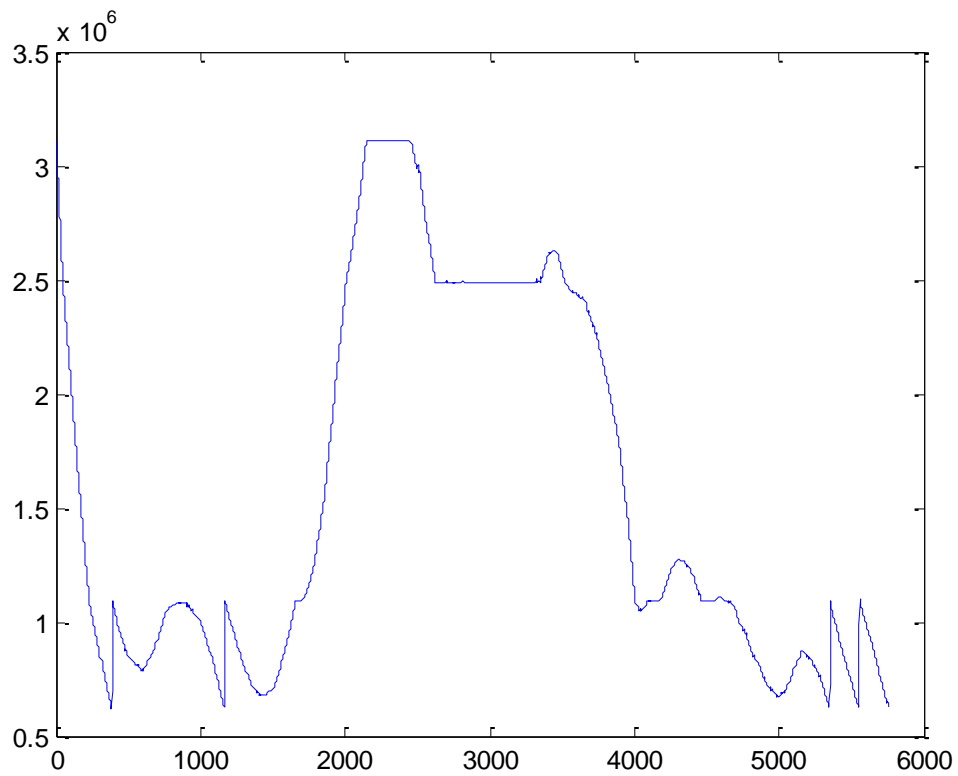
qui conditionnent les modes des différents équipements.

Nous avons réalisé des tests afin de trouver les paramètres optimaux, afin d'optimiser au maximum la consommation et nous avons organisé les résultats dans un tableau :

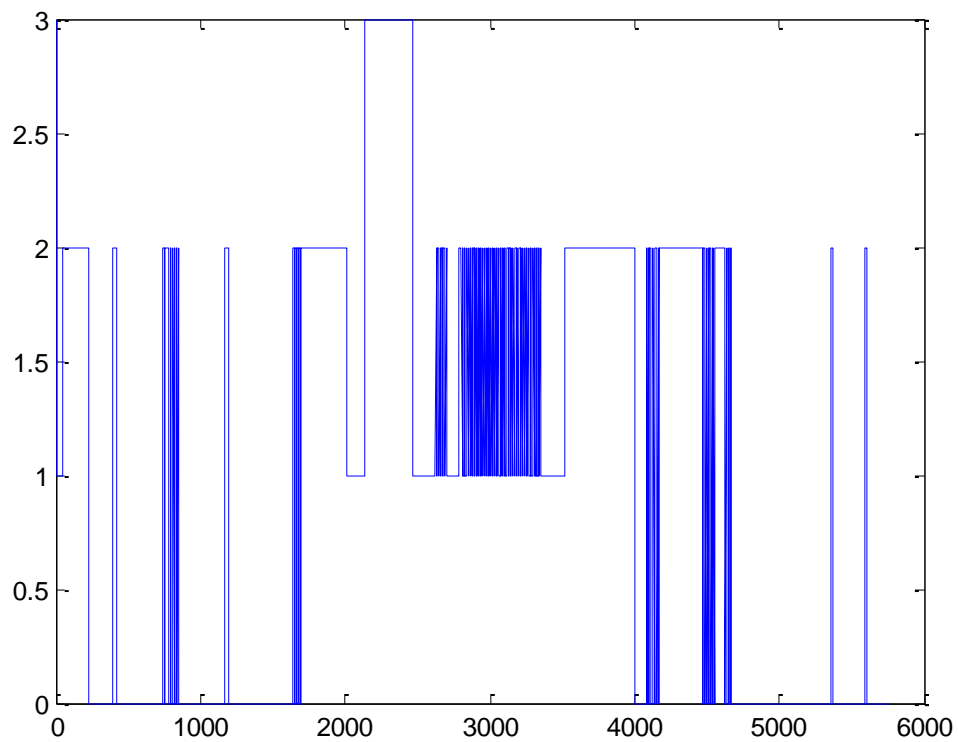
Batterie chargée initialement	Pourcentage Bas	Pourcentage Haut	Pourcentage Démarrage Moteur	Pourcentage Arrêt Moteur	Quantité de Gazole Restant	Quantité économisée
Non	20	40	20	40	58.2840	79.22%
Non	20	50	20	40	58.2180	78.42%
Oui	20	50	20	40	58.4760	81.54%
Oui	30	60	20	60	58.95	87.28%
Oui	35	80	20	80	58.884	86.48%
Oui	35	80	20	40	59.6160	95.35%



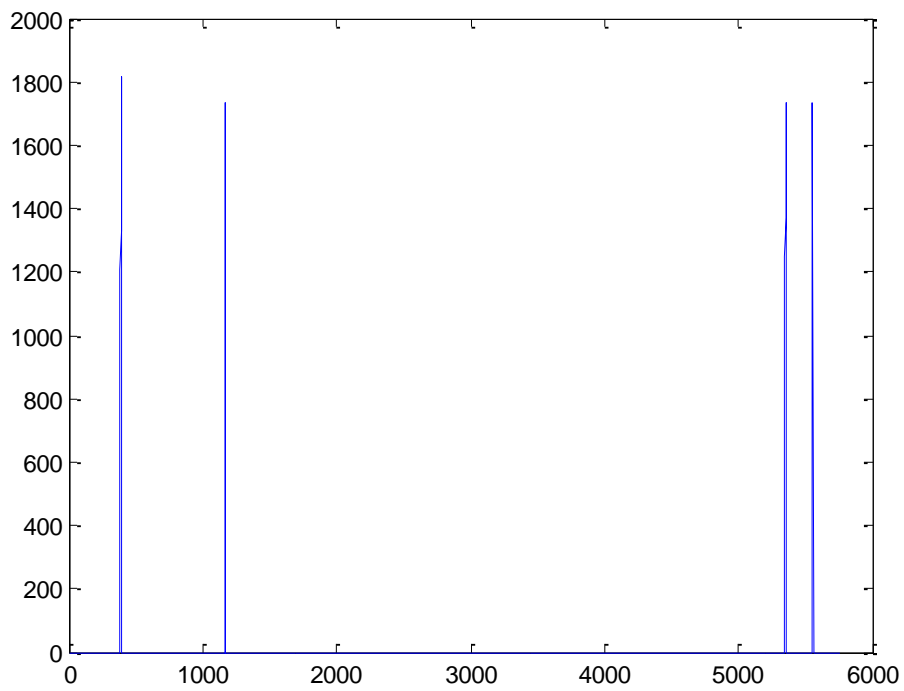
Pour le dernier test nous illustrons nos résultats par ces deux graphes :



Niveau de charge de la batterie : on observe peu de pics de charges sur les quatre jours

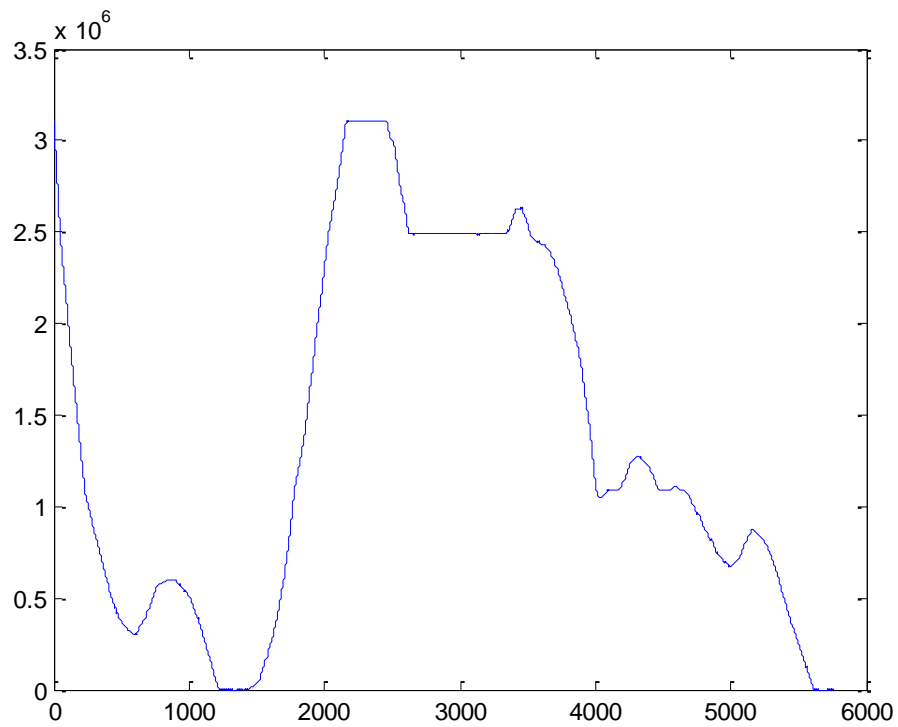


Evolution des modes durant la navigation : 1 mode normal, 2 mode économique, 3 mode haute consommation, 0 mode secours



Puissance délivrée par le moteur

Afin de vérifier l'utilité du moteur nous avons retiré le moteur du modèle et relancé la simulation. Voici l'état de charge de la batterie après la simulation :



On remarque que la batterie descend pendant une durée non négligeable à 0%. On ne peut donc pas se passer du moteur, bien que sa consommation soit réduite.

# CONCLUSION

En conclusion, l'objectif d'économie d'essence est largement rempli par notre modèle. Nous avons réussi à économiser jusqu'à 95% de carburant sur un trajet de 4 jours. Nos choix dans les différents états semblent confirmés par les dernières simulations. En effet, il n'est pas possible de se passer du moteur mais nos optimisations et leur prise en charge par le système assure un fonctionnement largement acceptable. L'état de secours n'est que très peu atteint, et sur des périodes très courtes. A contrario, le mode économique est très souvent retrouvé. Ce mode ne compromet cependant pas le confort et semble tout à fait acceptable dans une optique de performance énergétique.

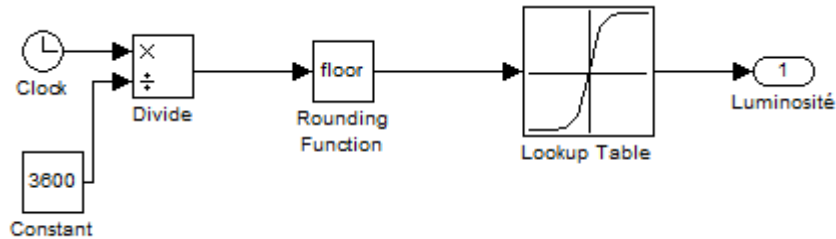
Il nous semble cependant important de souligner les points de notre modélisation qui nécessiteraient un approfondissement plus complet :

Si nous avons tout fait pour que notre modèle fonctionne, nous n'avons pas pu tout prendre en compte. Par exemple, notre batterie est très simplifiée. La simulation ne rend surement pas compte fidèlement de ce qu'il se passe réellement, mais elle semble respecter les grands principes physiques et convient aux données moyennes observées en situation réelle.

La simulation des différents composants de notre modèle nous a pris plus de temps que prévu et nous n'avons donc pas pu approfondir le contrôleur comme espéré. Il aurait été très intéressant de faire tourner notre modèle sur un nouveau trajet, avec de nouvelles cartes de par exemple. De plus, nous aurions pu rajouter au modèle un accès météo afin d'anticiper au mieux les consommations et productions à moyen terme (+6h).

# ANNEXES

## ANNEXE A



Modèle du soleil qui va chercher toutes les heures une nouvelle valeur luminosité dans un tableau créé au préalable dans MATLAB.

## ANNEXE B

Code du contrôleur :

```
function [CRéfrigérateur,CLumInt,CNav,CPilote,CLumExt,CMoteur, dernierAllMot] =  
fcn(time,EBatterie,QReservoir, dernierAllumageMoteur)  
  
%contrôleur  
pourcentageBas = 35; %pourcentage à partir duquel certains appareils se mettent en mode  
secours (=s'éteignent)  
pourcentageHaut = 80; %pourcentage de charge au-dessus duquel les appareils  
fonctionnent normalement  
pourcentageArretMoteur = 40; %pourcentage maximum au dessus duquel le moteur n'a plus  
besoin de charger la batterie  
pourcentageDemarrageMoteur = 20; %pourcentage critique à partir duquel il faut allumer  
le moteur pour recharger les batteries  
  
CapaBatterie = 3110400;  
  
modeNormal = 1;  
modeEco = 2;  
modeSecours = 0;  
modePuissance = 3;  
  
moteurEteint = 0;  
moteurAllume = 1;  
  
CRéfrigérateur = modeNormal;  
CLumInt = modeNormal;  
CNav = modeNormal;  
CPilote = modeNormal;  
CLumExt = modeNormal;  
  
dernierAllMot = dernierAllumageMoteur; %décrit le dernier état du moteur connu  
  
pourcentageCharge = (EBatterie/CapaBatterie) *100;  
  
if dernierAllumageMoteur == uint16(moteurAllume)
```

```
    CMoteur = moteurAllume;
else
    CMoteur = moteurEteint;
end

if pourcentageCharge < pourcentageHaut
    CRéfrigérateur = modeEco;
    CLumInt = modeEco;
    CNav = modeEco;
else
    CRéfrigérateur = modeNormal;
    CLumInt = modeNormal;
    CNav = modeNormal;
    CPilote = modeNormal;
    CLumExt = modeNormal;
end

if pourcentageCharge > 99
    CRéfrigérateur = modePuissance;
end

if pourcentageCharge > pourcentageArretMoteur
    CMoteur = moteurEteint;
    dernierAllMot = uint16(moteurEteint);
end

if pourcentageCharge < pourcentageBas
    CRéfrigérateur = modeSecours;
    CLumInt = modeSecours;
    CNav = modeSecours;
end

if pourcentageCharge < pourcentageDemarrageMoteur
    CMoteur = moteurAllume;
    dernierAllMot = uint16(moteurAllume);
end
```

# SOURCES

[1] <http://www.tpepanneauxsolaires.fr/rentabilite.html>

[2] <http://www.assistancescolaire.com/eleve/6e/svt/reviser-une-notion/les-variations-de-l-eclairage-et-de-la-temperature-dans-un-meme-lieu-6sce06>

[3] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Pouvoir\\_calorifique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pouvoir_calorifique)

[4] Hybrid System for IMOCA Open 60 – Final Report - Arnaud Thuilot

[5] Le guide des Glénans