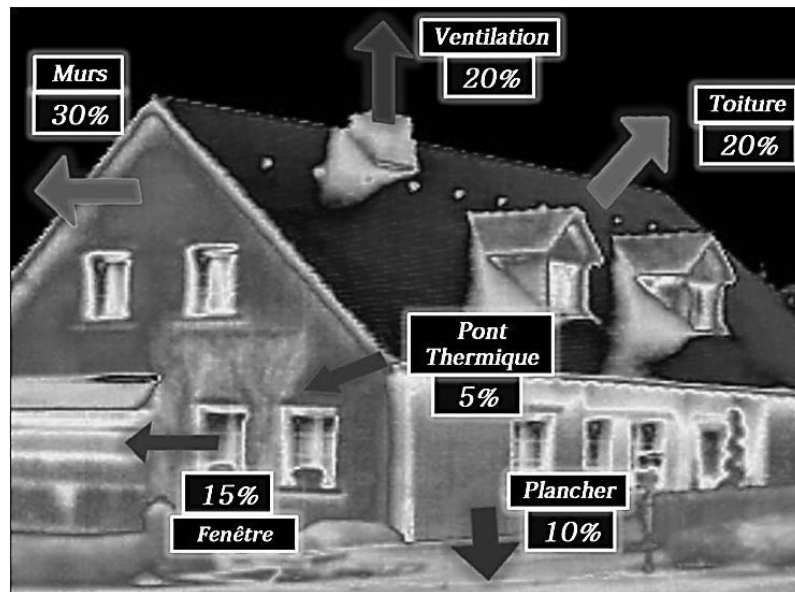


## Thermographie aérienne d'une station de ski par ballon captif

La thermographie infrarouge est un outil de diagnostic permettant de détecter des variations thermiques locales et des déperditions de chaleur (ensemble des fuites calorifiques) sur des bâtiments publics ou privés.

La technique est basée sur la captation d'images par une caméra thermique, l'énergie émise ayant un rapport direct avec la température du matériau.



**Figure 1 : thermogramme d'une maison individuelle**

Les déperditions, ainsi mises en évidence, peuvent être dues à :

- des isolants de mauvaise qualité, dégradés ou sous-dimensionnés ;
- une existence de ponts thermiques ;
- une présence d'humidité ;
- des défauts d'étanchéité.

La thermographie par ballon captif (ballon relié au sol par un câble) permet de cibler plus précisément un bâtiment. Elle présente l'avantage de réduire les délais d'intervention, de simplifier les démarches administratives, et elle est sans danger pour les personnes présentes sur la zone d'intervention.

Le ballon, gonflé à l'hélium (gaz porteur plus léger que l'air), peut être équipé d'un système de géo référencement intégrant un récepteur GPS. La caméra thermique est fixée sur une nacelle, l'ensemble est piloté depuis le sol par un système de radiocommande. Les images sont visualisées en temps réel depuis le sol sur un écran de contrôle grâce à un système de transmission vidéo sans fil.

## Partie1 : Etude théorique

### Implantation du projet.

Le maire d'une commune de montagne incluant une station de ski située à 1 800 m d'altitude désire lancer une opération de thermographie aérienne. Lors des vacances d'hiver, la venue des vacanciers génère un revenu important pour la commune mais elle est aussi un facteur influant sur les dépenses énergétiques.

Le but de cette opération sera de valider le travail réalisé sur les constructions neuves et de mesurer les progrès effectués sur les bâtiments en cours de réhabilitation. Cette étude qui portera autant sur les toitures que les façades devra se dérouler en période froide pour être exploitable.

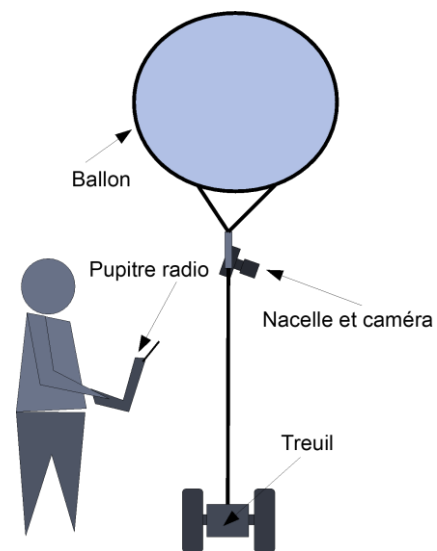
### Analyse du besoin

Description du ballon captif.



**Figure 2 : ballon captif**

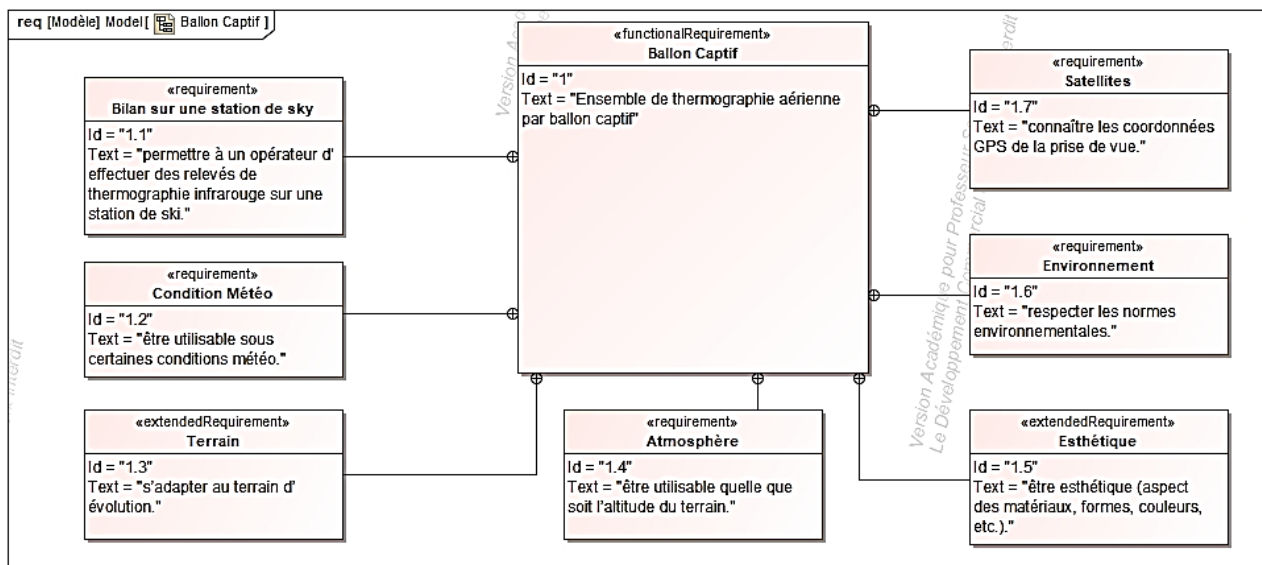
Le ballon est hissé en altitude par déroulement d'un câble en matière synthétique à haute performance sur le tambour d'enroulement du treuil.



**Figure 3 : dispositif par ballon captif**

L'opérateur est au sol avec son pupitre de commande. Il peut piloter à distance l'orientation ainsi que le zoom de la caméra qui est suspendue au ballon par l'intermédiaire d'une nacelle. Le document technique **DT1** présente les chaînes d'information et d'énergie du système étudié.

**Figure 4 : diagramme des exigences**



La caméra retenue avec son module de transmission vidéo et les différents systèmes de fixation représentent une masse de 1,7 kg à laquelle il faut ajouter la nacelle et le câble, soit une masse totale de 3,7 kg.

Le ballon à utiliser doit permettre l'élévation de l'ensemble du dispositif dans de bonnes conditions.

Un ballon de type sphère est un produit peu coûteux et performant par faible vent. Ses performances sont vite limitées avec le vent car son coefficient de pénétration dans l'air ( $C_x$ ) est très défavorable par rapport à celui d'un ballon dirigeable.

Un ballon dirigeable est très stable au vent, il apporte un confort appréciable et une facilité de travail sans commune mesure.



**Figure 5 : ballon sphère**

Le ballon gélule est un compromis entre le ballon sphère et le ballon dirigeable.

Facilement transportable, il a également une bonne pénétration dans l'air.



**Figure 6 : ballon gélule**

	Dimensions (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Masse (kg) enveloppe	Traction* (daN) maximale	Portabilité annoncée par le constructeur (kg)
Sphère 1	2	4,2	1,5	2,7	1,9
Sphère 2	2,3	6,4	2,0	4,4	2,6
Sphère 3	2,5	8,2	2,4	5,8	3,8
Gélule 1	2,9 × 1,6 × 2	5,6	2,4	3,2	2,1
Gélule 2	3,6 × 1,8 × 2,2	8,5	3,2	5,3	3,7
Gélule 3	3,8 × 2 × 2,3	10,5	3,7	6,8	4,5
Dirigeable 1	4,2 × 1,9	8	3,5	4,5	3,0
Dirigeable 2	5,0 × 2,0	10,2	3,8	6,4	4,5

\*la traction correspond à l'effort ascendant que fournit le ballon pour porter les masses transportées et maintenir une tension dans le câble qui le relie au treuil.

**Tableau 5 : dimensions, caractéristiques et performances (en plaine) des différents ballons captifs**

**Q1. Choisir**, en le justifiant, le modèle de ballon le mieux adapté.

### Analyse des écarts entre la traction attendue et les résultats obtenus avec le modèle de calcul en altitude

*Objectif de cette partie : vérifier les performances du ballon en altitude à partir d'un modèle d'équations physiques fourni et les comparer à celles annoncées par le constructeur.*

Le ballon retenu est le ballon gélule 2 car il permet, d'après les données du constructeur, de transporter la caméra retenue associée à son module de transmission vidéo, les différents systèmes de fixation ainsi que la nacelle et le câble, soit une masse totale de 3,7 kg.

Cependant, les performances annoncées (voir tableau 5 ) correspondent à une utilisation à une altitude proche du niveau de la mer. La pression atmosphérique, plus faible en altitude, aura inévitablement une influence sur la traction du ballon.

La traction et la portabilité en altitude peuvent être calculées à partir d'un modèle théorique simplifié.

### Modélisation des actions mécaniques :

- il est prévu d'utiliser le ballon à une altitude comprise entre 1800 m (altitude de la station de ski) et 1950 m (ballon en vol au bout de 150 m de câble) ;
- le ballon, en altitude au bout de son câble, est soumis à une action mécanique ascensionnelle (poussée d'Archimède) modélisée par une force dirigée vers le haut et s'exerçant au point  $G_b$  (voir **DR3**) ;
- l'ensemble {ballon, nacelle + caméra, câble déroulé} est soumis à l'action mécanique du câble enroulé sur le tambour du treuil qui l'empêche de s'envoler et modélisée par une force s'exerçant au point  $K$  (voir **DR3**) ;
- les actions mécaniques de la pesanteur sur le ballon, la nacelle + caméra et le câble déroulé sont modélisées par des forces s'exerçant respectivement aux points  $G_b$ ,  $G_n$  et  $G_c$  (voir **DR3**). Prendre  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

### Définition de la poussée d'Archimède

Tout corps entièrement plongé dans un fluide au repos subit une force verticale, dirigée de bas en haut et opposée au poids du volume de fluide déplacé.

### Formule internationale du nivellement barométrique

$$p(h) = 101325 \cdot \left(1 - \frac{0,0065 \cdot h}{288,15}\right)^{5,255} \quad (\text{en Pa})$$

Cette formule permet, dans une première approche, le calcul de la pression de l'air en pascal à une certaine altitude  $h$  (en m), sans avoir besoin de connaître la température.

### Loi des gaz parfaits

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T} \quad (\text{en kg} \cdot \text{m}^{-3})$$

Cette relation permet de déterminer la masse volumique d'un gaz parfait en fonction de la pression  $p$  en pascal et de la température  $T$  en kelvin.  $R$  est la chaleur spécifique en  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Pour l'air :  $R = 287,05 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

**Q2. Représenter** sur le document réponse **DR3** les différentes forces extérieures qui agissent sur l'ensemble {ballon, nacelle + caméra, câble déroulé}.

La traction du ballon correspond à la norme de l'effort ascendant qu'il est capable de fournir pour porter le matériel et tendre le câble qui le relie au treuil.

Sa valeur est donc égale à la différence entre la norme de la poussée d'Archimède à laquelle est soumis le ballon et la norme du poids de l'enveloppe du ballon et du gaz qui est à l'intérieur (hélium de masse volumique  $0,178 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

**Q3. Déterminer** en pascal la pression de l'air à l'altitude du ballon. **En déduire** la masse volumique de l'air à cette même altitude pour laquelle la température est de 275,5 kelvins.

**Q4. Déterminer** la traction du ballon gélule 2 exprimée en newton.

Pour la suite, considérer la traction égale à 40 N.

Le tableau 5 nous montre que la portabilité (masse transportable) d'un ballon gélule varie avec la traction. Le modèle de calcul qui permet de déterminer cette portabilité nous est cependant inconnu.

**Q5. Tracer**, à partir des données du tableau 5, une courbe de la portabilité annoncée par le constructeur en kg, en fonction de la traction en daN, pour les ballons de type gélule. **En déduire**, à l'aide de cette courbe, la portabilité effective du ballon utilisé.

**Q6. Conclure** sur la pertinence de ce choix de ballon.

## 1. Comparaison, en termes d'autonomie, des résultats de l'expérimentation réalisée en plaine avec les résultats obtenus avec un modèle multiphysique

*Objectif de cette partie : analyser des écarts entre l'autonomie du système qui a été constatée au niveau de la mer par des essais et celle que l'on peut anticiper en altitude par simulation.*

La conclusion de la question Q6 conduit à une remise en cause du choix de la gélule 2 comme ballon porteur. L'étude portera désormais sur la gélule 3 qui répond à la contrainte de portabilité de l'ensemble étudié.

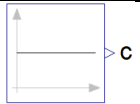
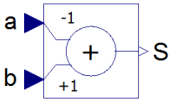
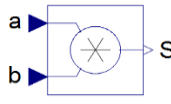
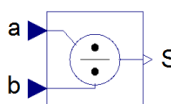
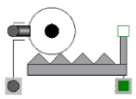
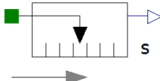
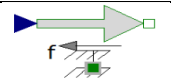
La difficulté pour se déplacer en montagne sur certains lieux limite la possibilité de recharge des batteries du treuil. Des expérimentations avec le matériel choisi ont été réalisées en plaine au niveau de la mer et donnent une autonomie de l'ordre 35 montées et descentes du ballon.

La traction du ballon étant moins importante en altitude, l'autonomie devrait être supérieure. On se propose de l'estimer à partir des résultats de simulation d'un modèle multiphysique.

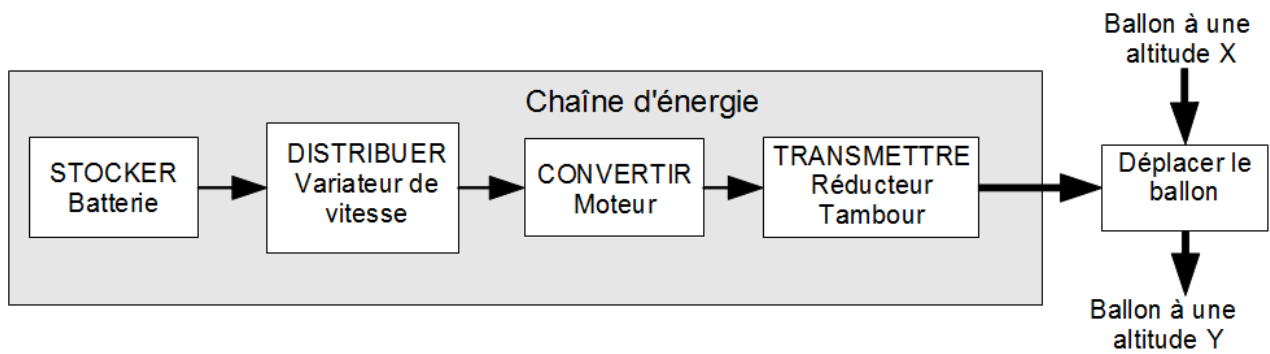
### Analyse du modèle multiphysique

Le modèle (voir **DT2**) de la chaîne d'énergie du treuil avec la batterie, le moteur, la transmission et le câble ainsi que le ballon dans l'atmosphère nous permet de prendre en compte tous les paramètres de fonctionnement. Comme tout modèle, il comporte certaines simplifications :

- température constante entre 1 800 m et 1 950 m ;
- masse volumique et volume de l'hélium constants entre 1 800 m et 1 950 m ;
- exposant de la formule internationale du nivellement barométrique égal à 5.

Constante		La valeur de la constante $c$ est définie par le nombre placé en paramètre.
Additionneur / Soustracteur		La valeur en sortie est la somme ou la différence des deux entrées. Ici : $S = b - a$
Multiplieur		La valeur en sortie est le produit des deux entrées. Ici : $S = a \cdot b$
Diviseur		La valeur en sortie est le quotient des deux entrées. Ici : $S = a/b$
Transformateur de mouvement		Transformation de mouvement de rotation en translation (entrée : angle, sortie : distance). La valeur du <i>ratio</i> associé correspond au coefficient $\frac{\text{grandeur d'entrée}}{\text{grandeur de sortie}}$ .
Capteur virtuel		Cet élément permet de mesurer une grandeur physique (vitesse, position).
Effort		Cet élément permet de convertir une valeur numérique en force.

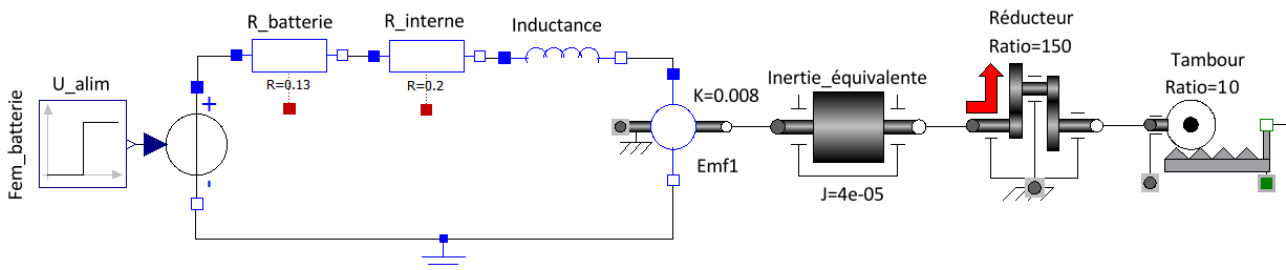
**Tableau 6 : définition des principaux opérateurs du modèle multiphysique**



**Figure 7 : chaîne d'énergie du treuil**

La tension moyenne d'alimentation du moteur est de 12 V . La vitesse angulaire en sortie du moteur est réduite par un réducteur à engrenages et une transmission par poulies et courroie crantées. Le tambour permet d'enrouler ou de dérouler le câble qui maintient le ballon.

Dans ce type d'utilisation, le système peut être considéré comme étant irréversible.



**Figure 8 : modèle comportemental du treuil**

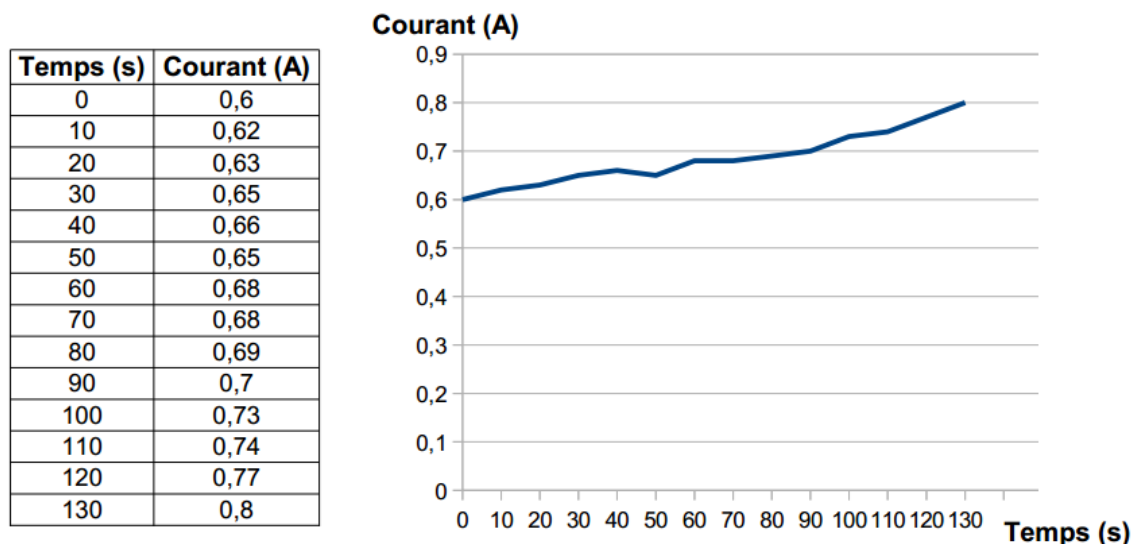
La puissance en entrée du composant nommé tambour peut-être caractérisée par une grandeur d'effort de type *couple* (en N.m) et une grandeur de flux de type *vitesse angulaire* (en  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

**Q7. Indiquer** la nature et l'unité des deux grandeurs d'effort et de flux correspondant à la puissance en sortie du composant nommé tambour.

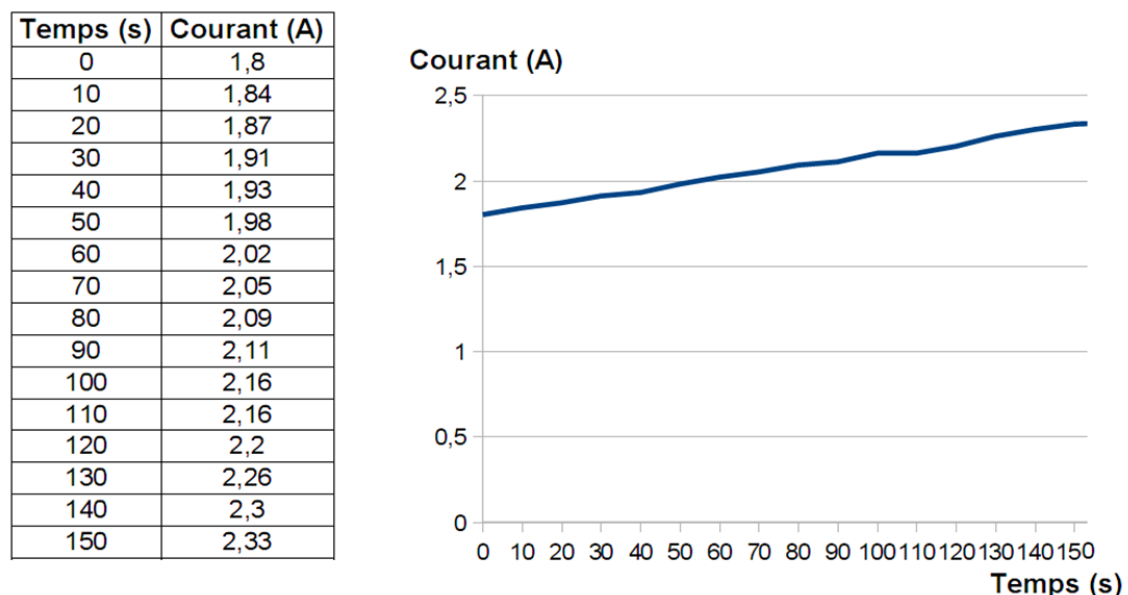
**Q8. Justifier**, à l'aide des données du treuil sur le TD3, la valeur du paramètre « ratio = 10 », exprimé en  $\text{m}^{-1}$ , du composant nommé tambour, dont la définition est donnée dans le tableau 6.

**Q9. Préciser** les limites du modèle proposé pour le tambour assimilé à une simple transformation de mouvement de rotation en translation à paramètre constant.

Des essais de montée et descente du ballon ont été réalisés en pleine avec l'équipement de thermographie infrarouge. Le courant consommé en sortie de la batterie a été relevé toutes les dix secondes jusqu'à ce que le ballon atteigne la hauteur de 150 m. L'ensemble des valeurs et les tracés correspondants sont représentés ici.



**Figure 9 : mesures du courant consommé lors de la montée**



**Figure 10 : mesures du courant consommé lors de la descente**

**Q10. Expliquer**, en s'appuyant sur les valeurs des courants moyens et de la durée du mouvement, les différences de comportement entre la montée et la descente du ballon.

Pour limiter les phases de recharge, compte tenu du terrain accidenté, la batterie embarquée sur le treuil est une batterie de tension 12 V et de capacité 4 500 mA.h.

**Q11. Calculer** l'énergie disponible théoriquement dans cette batterie en watt-heure et en joule.

Pour simplifier la suite de l'étude, le rendement du variateur de vitesse est considéré égal à 100 %. L'énergie qu'il consomme sera donc négligée.

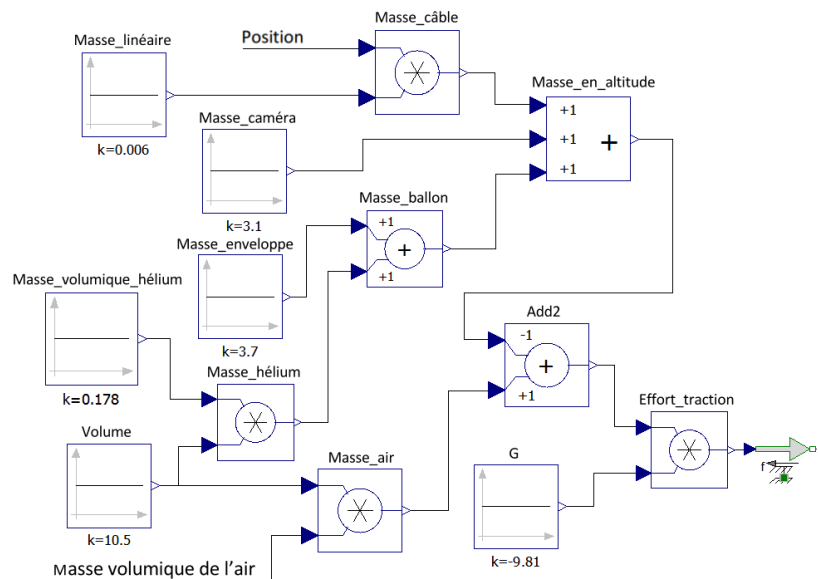
**Q12. Calculer**, compte tenu de la tension d'alimentation du moteur qui est de 12 V et du courant moyen, l'énergie consommée en joule pendant une montée et une descente du ballon.



**Q13. Dédire** de ces mesures le nombre de montées et de descentes possible entre deux recharges en plaine et comparer avec les valeurs constatées lors des essais.

Une première partie du modèle (voir **DT2**) permet de calculer la masse volumique de l'air en fonction de la température et de l'altitude. Cela va permettre de prendre en compte la variation des conditions atmosphériques en fonction de l'altitude.

Une autre partie du modèle permet de simuler le comportement du ballon dans l'atmosphère en déterminant l'effort de traction du ballon en fonction de différents paramètres.



**Figure 11 : modèle du ballon dans l'atmosphère**

Dans ce modèle, le ballon se déplace selon une trajectoire strictement verticale.

**Q14. Expliquer**, en observant la figure 11 et le DT2, comment est calculée ici la masse du câble suspendu sous le ballon.

**Q15. Expliquer**, en observant la figure 11 et le DT2, comment est calculée la masse d'air déplacée par le ballon.

**Q16. Indiquer**, en observant la figure 11 et le DT2, le rôle de l'élément nommé « Masse\_en\_altitude ».

Le document technique **DT1** présente deux courbes obtenues à partir de la simulation du modèle multiphysique.

La simulation a été réalisée pour une altitude comprise entre 1 950 m (ballon en vol au bout de 150 m de câble) et 1 800 m (arrivée du ballon au sol).

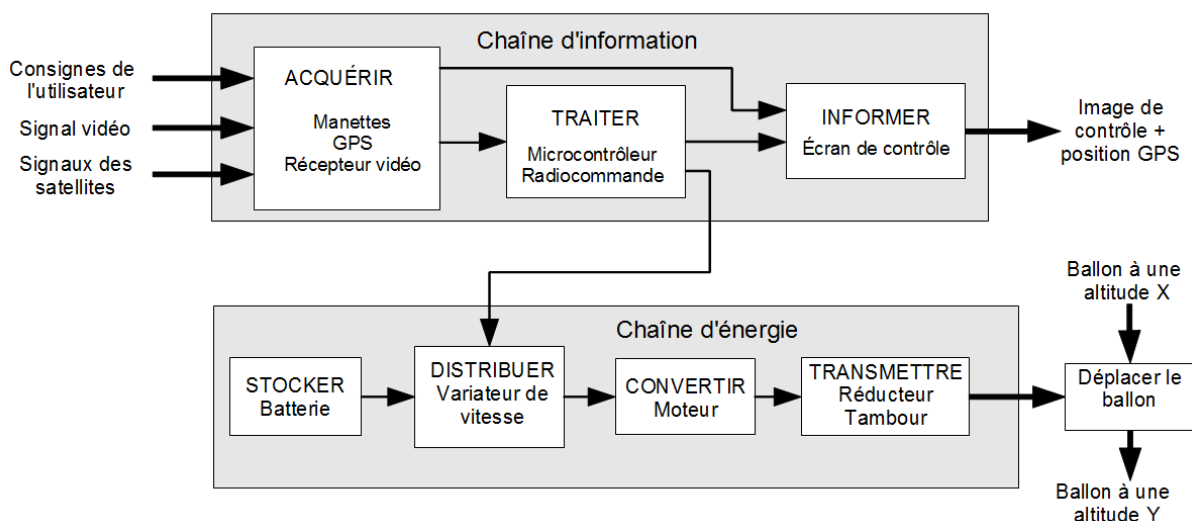
**Q17. Calculer**, compte tenu de la tension d'alimentation du moteur qui est de 12 V et des données issues de la simulation, l'énergie consommée en joule pendant une descente du ballon.

La simulation a permis de déterminer que l'énergie consommée pendant une montée est de 900 joules.

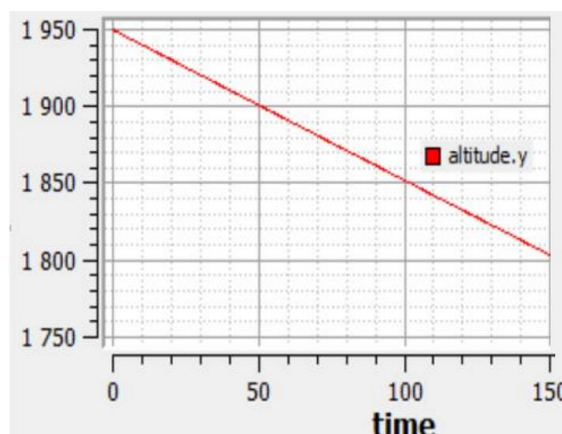
**Q18. En déduire** le nombre de montées et de descentes possibles entre deux recharges de batterie lorsque le ballon est utilisé en altitude.

**Q19. Conclure** sur l'hypothèse de départ concernant l'amélioration de l'autonomie en altitude.

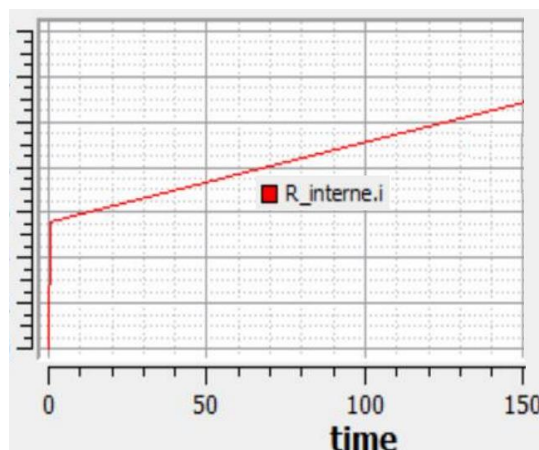
## Chaîne d'information et d'énergie du dispositif de photographie



## Résultats de simulation du modèle multiphysique (descente du ballon)

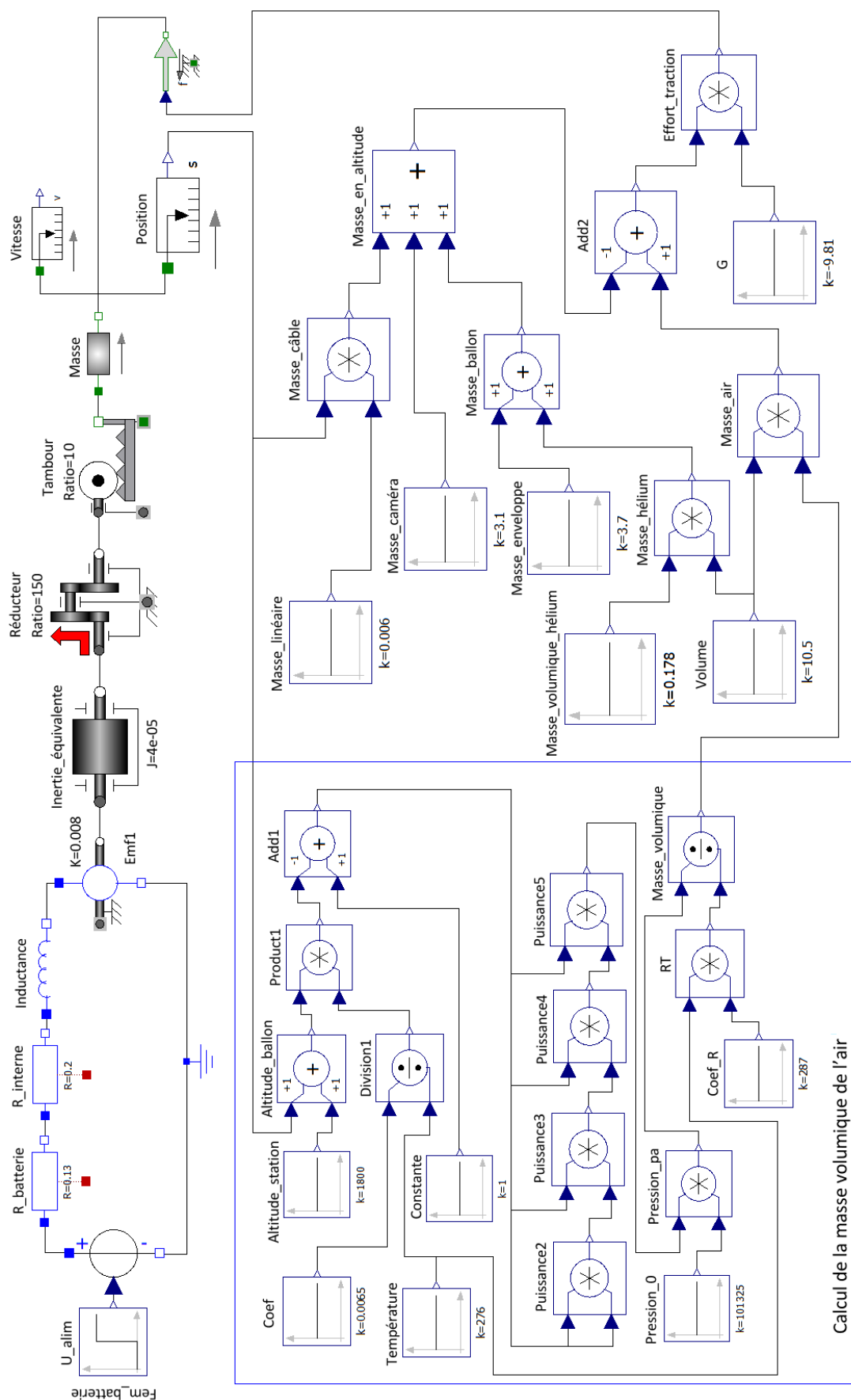


Variation de l'altitude en mètre en fonction du temps en seconde



Variation du courant en ampère en fonction du temps en seconde

## Modèle multiphysique



## Document technique DT3

Le treuil permet de dérouler et enrouler le câble de fixation du ballon.

### Treuil électrique dorsal

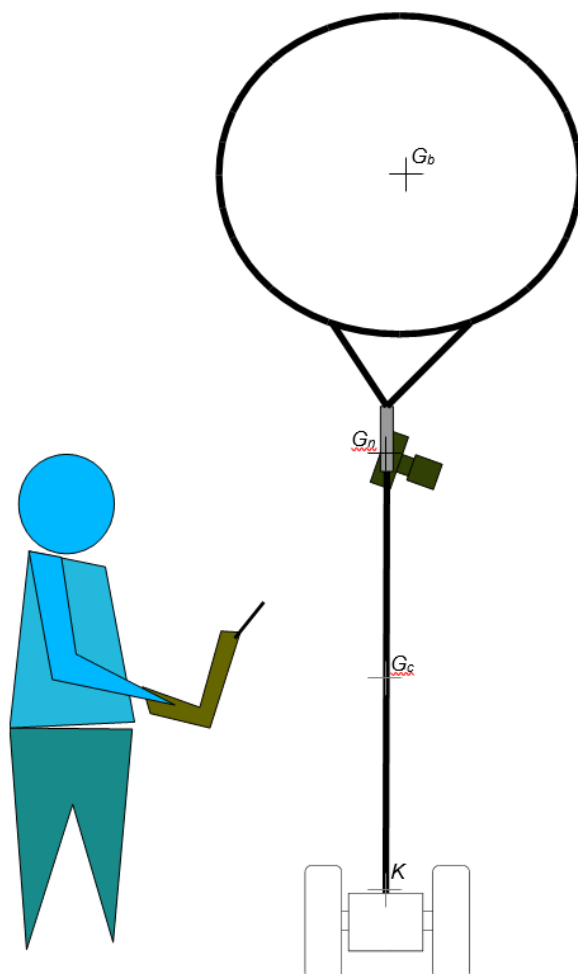


*Utilisation sur terrain difficile, autonomie réduite*

#### Caractéristiques techniques

- structure aluminium-fibre de verre ;
- moteur 250 W ;
- vitesse de rembobinage de 0 à 50 m·min<sup>-1</sup> ;
- diamètre d'enroulement de 20 cm ;
- capacité : 2 × 400 m, type Dyneema 150 kg ;
- batteries 36 V – 1 500 mA·h ;
- masse linéaire du câble : 0,003 kg·m<sup>-1</sup> ;
- traction : 10 kg ;
- 3 compartiments de rangement ;
- masse en ordre de marche 11,5 kg ;

## Document réponse DR3



## Partie 2 : Activité pratique

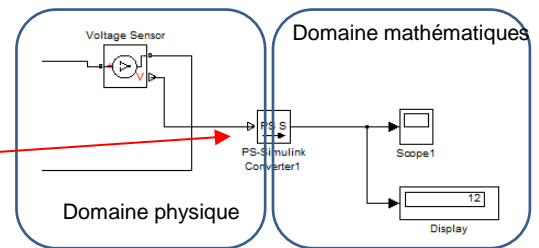
### Travail proposé, objectif.

Je vous propose de prendre en main le modèle multi-physique utilisé dans le sujet.

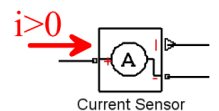
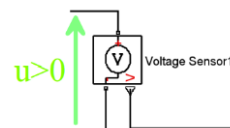
Nous avons observé que les simplifications du modèle entraînaient un écart important entre les valeurs simulées et les valeurs réelles. Nous vous proposons d'affiner la qualité du modèle afin de minimiser ces écarts. Dans un premier temps vous ajouterez les composants nécessaires à la mesure de l'énergie électrique prélevée sur la batterie pendant un cycle de fonctionnement.

### Rappels :

L'univers Matlab est divisé en deux parties, le domaine des unités physiques réelles *PS* et le domaine des nombres mathématiques *S*. Il faut donc obligatoirement utiliser le *bloc PS-Simulink converter* pour passer d'un domaine à un autre.

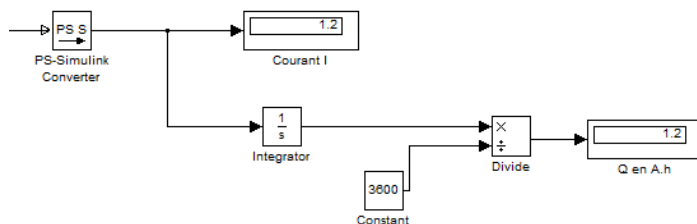


Comme dans le réel, les composants sont polarisés dans les simulateurs. Tous ces composants sont disponibles dans la bibliothèque Simulink :



- 1- **Ajouter** les composants permettant le calcul et l'affichage de la puissance électrique délivrée par la batterie.

Dans la structure suivante la valeur du courant est intégrée (on passe de  $I$  à  $I \cdot t$  avec une intégration qui est l'opération contraire de la dérivée).



- 2- Sur le principe précédent, **calculer puis afficher l'énergie en joule puis en W.h consommée par le treuil** pendant la durée de la simulation.
- 3- **Modifier** la structure du calcul de la pression de l'air en mettant en œuvre le bloc « Math function » disponible dans la librairie « Math Operation ». Il s'agit de retrouver le calcul exact en utilisant l'exposant 5,225 au lieu de 5.
- 4- **Ajuster** tous les éléments que vous jugez utiles afin d'affiner la modélisation dans le but de diminuer les écarts.