

BACCALAURÉAT SCIENTIFIQUE

Épreuve de sciences de l'ingénieur

Session 2013

Thermographie aérienne d'une station de ski par ballon captif

Éléments de correction

Q1. Argumenter, en quelques lignes, sur l'intérêt d'une thermographie aérienne plutôt que terrestre.

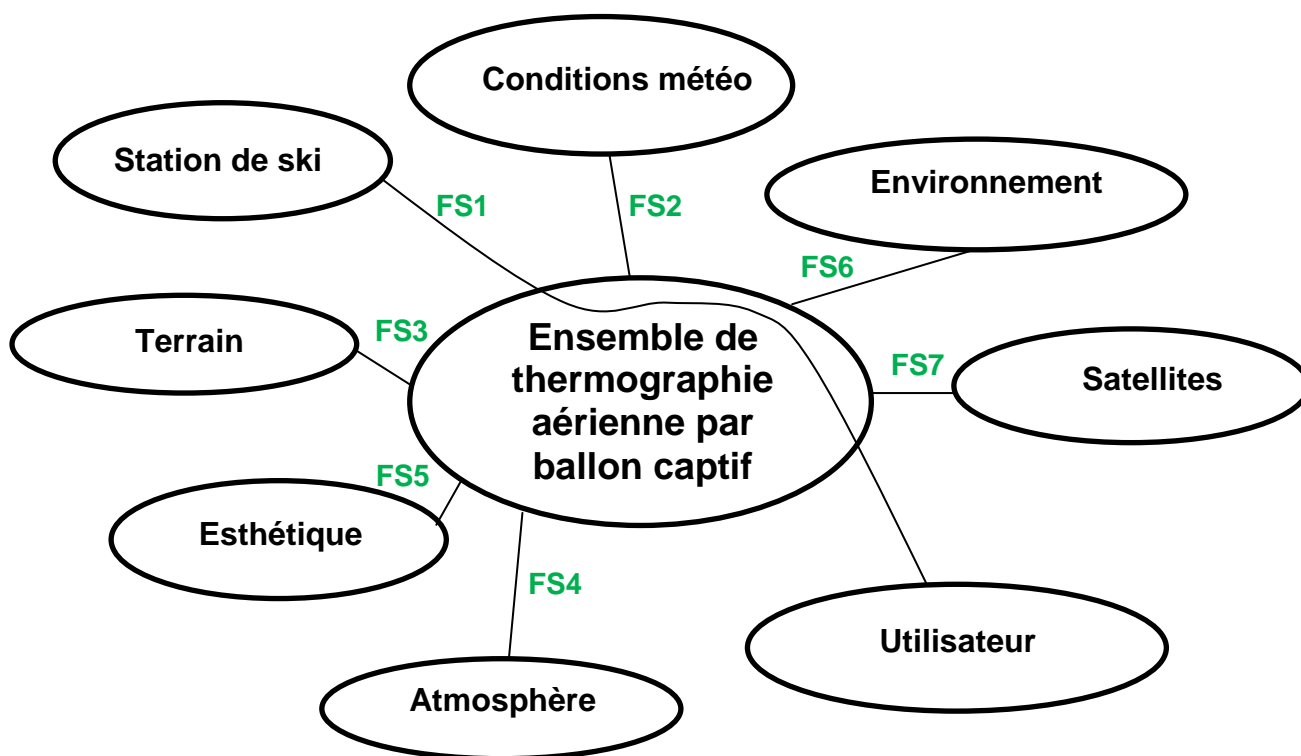
La thermographie aérienne permet de réaliser des cartographies thermiques de toitures de bâtiments de grande hauteur, ce que ne permettrait pas la thermographie terrestre. La thermographie aérienne permet également de réaliser les opérations suivantes :

- détection de cavités souterraines ;
- détection de fuites hydrauliques souterraines importantes ;
- contrôle de centres d'enfouissement ;
- recherche de pollutions sur terre et en mer.

Q2. Analyser les différents choix possibles de thermographie aérienne et donner pour chaque solution les avantages et les inconvénients en complétant le tableau sur le document réponses **DR1**.

	Thermographie par hélicoptère	Thermographie par avion	Thermographie par ULM	Thermographie par ballon captif
Nuisances sonores	Oui	Oui	Oui	Non
Production CO ₂	Oui	Oui	Oui	Non
Précision des prises de vue	Modérée	Modérée	Modérée	Élevée
Thermographie façades	Non	Non	Non	Oui
Thermographie toitures	Oui	Oui	Oui	Oui
Démarches administratives	Élevées	Élevées	Élevées	Faibles

Q3. Compléter, sur le document réponse **DR1**, le diagramme des interacteurs avec les différentes fonctions énumérées. **Classifier** celles-ci dans les trois catégories proposées sur le document réponse **DR1**.



	FS1	FS2	FS3	FS4	FS5	FS6	FS7
fonctionnelle	x	x	x	x			x
sociétale					x	x	
environnementale			x		x	x	

Q4. Donner, pour chacun des modèles de caméra ci-dessus, les avantages et les inconvénients pour l'utilisation souhaitée.

FLIR P660 : résolution moyenne, bonne autonomie, modèle le plus lourd et le plus encombrant parmi les trois caméras proposées, équipée d'un zoom x 8.

NEC AVIO TVS 500EXZ : résolution moyenne, autonomie plus faible que les deux autres caméras proposées, modèle léger d'encombrement moyen, équipée d'un zoom x 8.

Variocam HR Research : meilleure résolution que les deux autres caméras proposées, modèle le plus léger et le moins encombrant parmi les trois caméras proposées, bonne autonomie, pas de zoom.

Tableau de synthèse

	FLIR P660	NEC AVIO TVS 500EXZ	Variocam HR Research
Modèle			
Avantages	Zoom Autonomie	Zoom Masse Dimensions	Masse Autonomie Résolution Dimension
Inconvénients	Résolution Masse Dimensions	Autonomie Résolution	Zoom

Q5. Choisir, en le justifiant, un type de nacelle permettant le montage sous le ballon de la caméra sélectionnée.

La caméra retenue (modèle NEC AVIO TVS 500EXZ) a une masse de 1,5 kg. Seule la nacelle 2 peut porter cette charge.

Q6. Choisir, en le justifiant, le modèle de treuil adapté au type de relevés demandés.

Compte tenu des difficultés pour se déplacer en zone montagneuse (sentiers escarpés, escaliers, etc.), le treuil dorsal semble le plus approprié à ce contexte d'utilisation, même s'il est pénalisé par une autonomie plus faible que celle du modèle roulant.

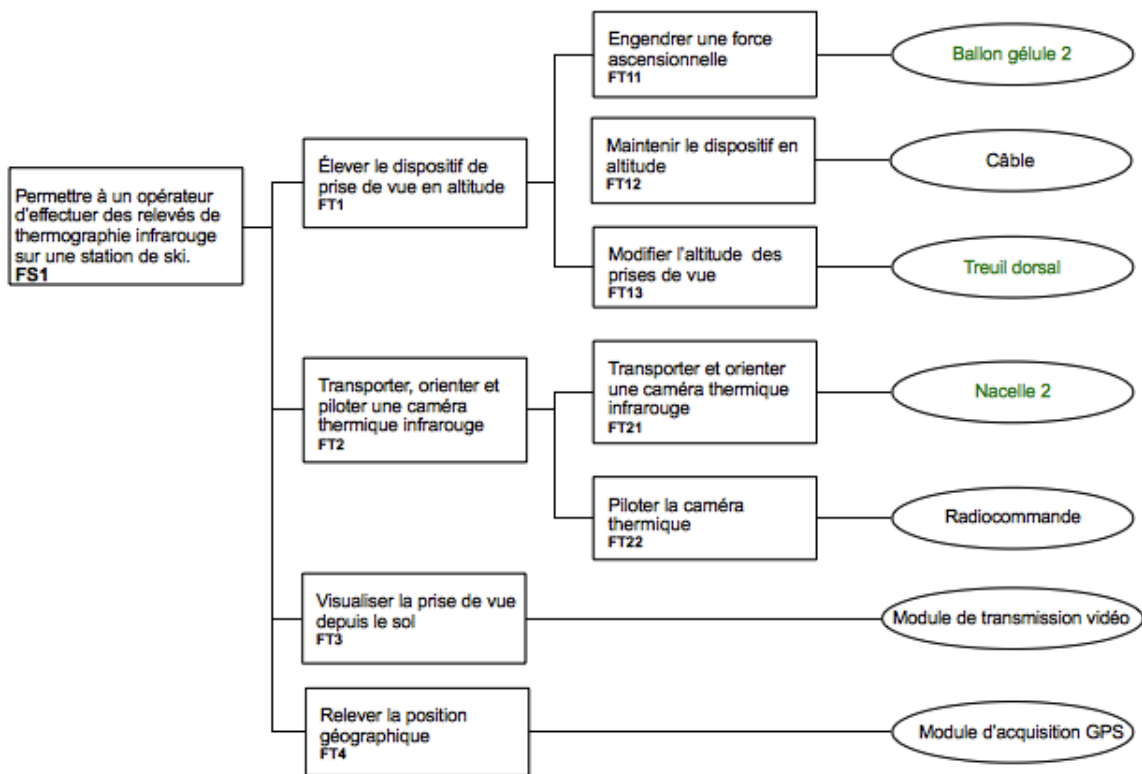
Q7. Choisir, en le justifiant, le modèle de ballon le mieux adapté.

La charge à transporter de 3,7 kg impose le choix entre la sphère 3, la gélule 2, la gélule 3, et le dirigeable 2.

L'importante prise au vent du modèle sphère rend son utilisation en montagne délicate. Le dirigeable est le modèle le plus difficile à transporter. Il est donc possible de choisir entre la gélule 2 et la gélule 3.

Même si la portabilité annoncée par le constructeur correspond exactement à la masse transportée (3,7 kg), il est possible de choisir la gélule 2, car ses autres caractéristiques (volume et masse plus faibles que celles de la gélule 3) sont adaptées à une utilisation en zone montagneuse.

Q8. Valider les choix effectués dans cette partie en complétant le diagramme FAST sur le document réponse **DR2**.

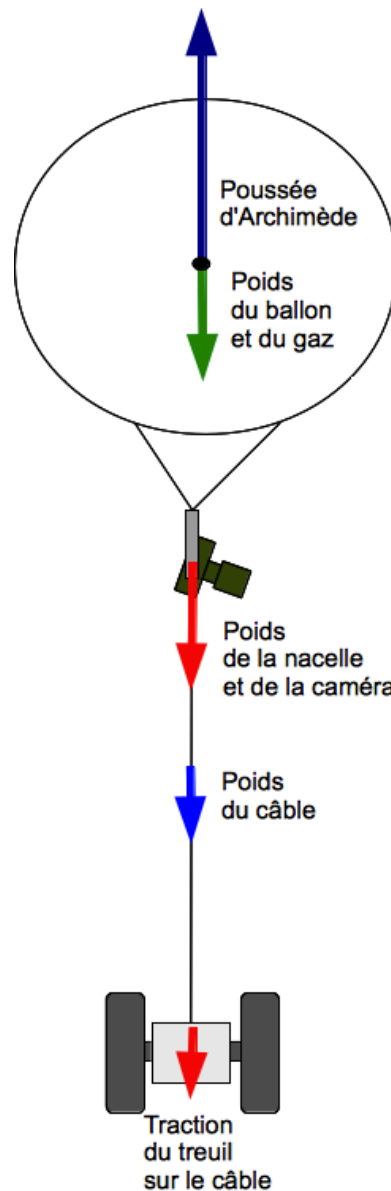


Q9. Justifier, en quelques lignes, le choix de la thermographie aérienne par ballon captif pour cette station.

L'étude thermographique de cette station de ski, incluant les façades et les toitures des habitations, doit obligatoirement se dérouler en période froide et d'affluence touristique. Il est donc souhaitable d'éviter les nuisances sonores et la production de gaz carbonique.

De fait, la thermographie aérienne par ballon captif s'impose. Elle est également en parfait accord avec l'objectif de communication et de valorisation de cette station.

Q10. Représenter sur le document réponse **DR3** l'ensemble des différentes forces extérieures qui agissent sur l'ensemble {ballon, nacelle + caméra, câble déroulé}.



Q11. Déterminer en pascal la pression de l'air à l'altitude 1950 m. **En déduire** la masse volumique de l'air à cette même altitude pour laquelle la température est de 275,5 kelvins.

La formule internationale du nivellement barométrique nous permet de calculer la pression atmosphérique à 1 800 m + 150 m, soit 1 950 m. La pression à cette altitude vaut :

$$p = 101325 \times \left(1 - \frac{0,0065 \times 1950}{288,15} \right)^{5,255} = 79993 \text{ Pa} \approx 80000 \text{ Pa}$$

Connaissant maintenant la pression atmosphérique, il est possible de déterminer la masse volumique de l'air à cette altitude, soit :

$$\rho_{\text{air}} = \frac{80000}{287,05 \times 275,5} = 1,012 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Q12. Déterminer la traction du ballon gélule 2 exprimée en newton.

Le volume du ballon permet de calculer la masse d'air déplacé, ainsi que la masse d'hélium dans le ballon.

Il reste à soustraire la masse de l'hélium et la masse de l'enveloppe, de la masse d'air déplacé.

Masse d'air déplacé :

$$m_{air} = \rho_{air} \times V_{ballon} = 1,012 \times 8,5 = 8,6 \text{ kg}$$

Masse d'hélium :

$$m_{He} = \rho_{He} \times V_{ballon} = 0,178 \times 8,5 = 1,5 \text{ kg}$$

Masse de l'enveloppe :

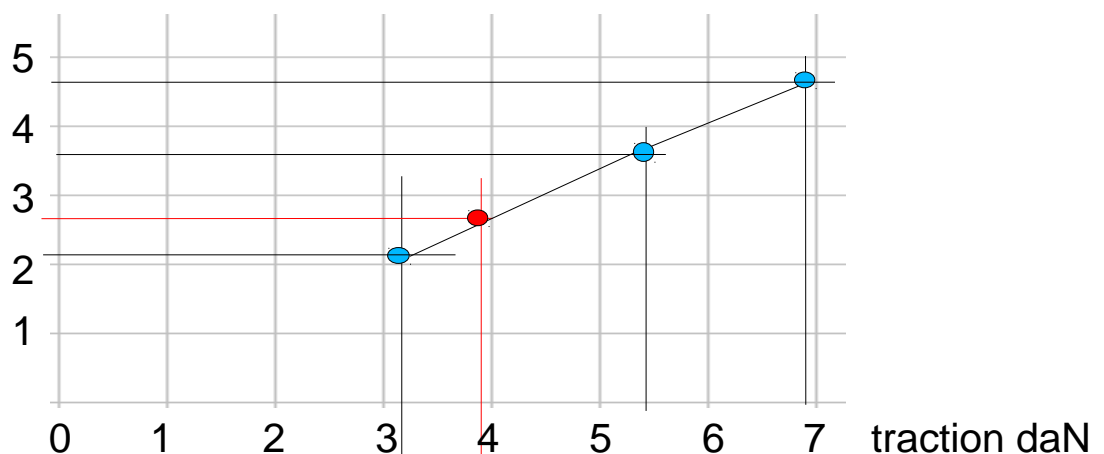
$$m_{env} = 3,2 \text{ kg}$$

La traction théorique du ballon est donc égale à :

$$(m_{air} - m_{He} - m_{env}) \times g = (8,6 - 1,5 - 3,2) \times 9,81 = 38,3 \text{ N}$$

Q13. 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.

Portabilité kg



Pour une traction d'environ 38 N, la courbe tracée nous donne une portabilité effective d'environ 2,7 kg.

Nous sommes donc loin de la portabilité théorique de 3,7 kg annoncée par le constructeur pour le ballon de type gélule 2.

Q14. Conclure sur la pertinence de ce choix de ballon.

Au regard de l'étude précédente, le ballon gélule 2 est donc insuffisant car il peut porter seulement 2,7 kg environ, alors que la charge est de 3,7 kg. Il faut donc passer à la taille supérieure et choisir le ballon gélule 3, dont la portabilité annoncée est de 4,5 kg.

Q15. Indiquer la nature et l'unité des deux grandeurs d'effort et de flux correspondant à la puissance en sortie du composant nommé tambour.

La puissance disponible à la sortie du tambour est une puissance mécanique de translation, caractérisée par le produit d'une force (grandeur d'effort – unité N) et d'une vitesse linéaire (grandeur de flux – unité $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Q16. Justifier, à l'aide des données fournies dans le tableau 4 page 6, la valeur du paramètre « ratio = 10 », exprimé en m^{-1} , du composant nommé tambour, dont la définition est donnée dans le tableau 6 page 10.

Le diamètre d'enroulement du tambour est de 20 cm, ce qui correspond à un rayon d'enroulement de 0,1 m.

La longueur d d'un arc de cercle de rayon R et d'angle α (en radian) s'exprime par :

$$d = R \cdot \alpha$$

Pour le tambour, le ratio angle/distance est donc :

$$\text{ratio} = \frac{\alpha}{d} = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,1} = 10 \text{ m}^{-1}$$

Q17. Préciser les limites du modèle proposé pour le tambour assimilé à une simple transformation de mouvement de rotation en translation à paramètre constant.

Le rayon du tambour est ici considéré constant alors qu'en réalité, il augmente lorsque le câble s'enroule, et diminue lorsque le câble se déroule.

Q18. 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.

On remarque que la montée est plus rapide que la descente. Ce qui est tout à fait normal car le ballon exerce un effort ascendant. Pour cette raison, le moteur doit donc fournir un effort plus important pendant la descente du ballon que pendant la montée. Le courant relevé pendant la descente est donc plus élevé.

Q19. Calculer l'énergie disponible théoriquement dans cette batterie en watt-heure et en joule.

La batterie peut fournir 1,5 ampère sous 36 volts pendant une heure. La dérivée de l'énergie par rapport au temps est égale à la puissance, soit :

$$\frac{dE}{dt} = P \Rightarrow dE = P \cdot dt$$

La puissance étant constante, alors :

$$\Delta E = P \cdot \Delta t$$

Donc :

$$\Delta E = U \cdot I \cdot \Delta t = 36 \times 1,5 \times 1 = 54 \text{ W} \cdot \text{h} = 194\,400 \text{ J}$$

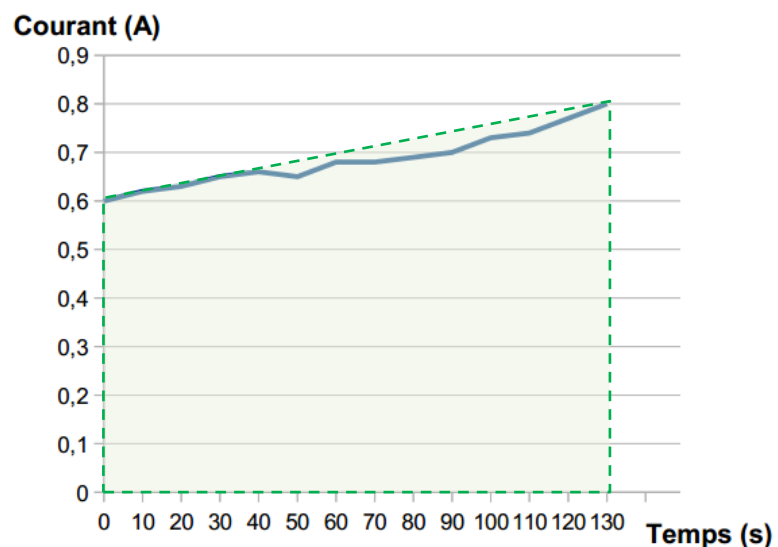
Q20. Calculer, compte tenu de la tension d'alimentation du moteur qui est de 12 V et du courant moyen, l'énergie consommée en joule pendant une montée et une descente du ballon.

La valeur moyenne d'une fonction f sur un intervalle $[a, b]$ est donnée par :

$$\bar{f} = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(t) dt$$

En assimilant la courbe d'évolution temporelle du courant à une droite affine, on peut déterminer géométriquement sa valeur moyenne.

Temps (s)	Courant (A)
0	0,6
10	0,62
20	0,63
30	0,65
40	0,66
50	0,65
60	0,68
70	0,68
80	0,69
90	0,7
100	0,73
110	0,74
120	0,77
130	0,8



La valeur moyenne du courant peut donc être déterminée en divisant l'aire du trapèze obtenu par la durée d'observation (130 secondes pour la montée du ballon).

Le courant moyen consommé pendant la montée du ballon est donc égal à :

$$\bar{I}_{montée} = \frac{1}{130} \times \frac{(0,6 + 0,8) \times 130}{2} = 0,7 \text{ A}$$

De manière identique, pour la descente, on obtient :

$$\bar{I}_{descente} = \frac{1}{150} \times \frac{(1,8 + 2,33) \times 150}{2} = 2,06 \text{ A}$$

L'énergie consommée pendant la montée est donc :

$$\Delta E = U \cdot \bar{I}_{montée} \cdot \Delta t = 12 \times 0,7 \times 130 = 1\,092 \text{ J}$$

De manière identique, pour la descente, on obtient :

$$\Delta E = U \cdot \bar{I}_{descente} \cdot \Delta t = 12 \times 2,06 \times 150 = 3\,708 \text{ J}$$

Soit, un total d'environ 4 800 joules pour un aller et retour du ballon.

Q21. Déduire 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.

L'énergie disponible dans la batterie est de 194 400 joules. Il faut 4 800 joules par aller et retour du ballon. Cela donne au final :

$$\frac{194\,400}{4800} \approx 40$$

Cette valeur de 40 a été obtenue à partir d'une mesure réalisée durant un seul aller et retour du ballon. Elle diffère quelque peu des 35 montées et descentes effectivement constatées lors des essais en plaine (erreur relative d'environ 14 %).

Cet écart montre notamment qu'en phase de conception, il n'est pas possible de dimensionner une batterie par extrapolation à partir d'une seule et unique mesure.

Q22. Expliquer, en observant la figure 11 et le DT2, comment est calculée ici la masse du câble suspendu sous le ballon.

La masse du câble suspendu sous le ballon est obtenue en multipliant la longueur de câble déployée par sa masse linéaire (ou linéique), qui, d'après le modèle multiphysique fourni dans le DT2, est de $0,006 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$:

$$m_{\text{câble déployé}} = 0,006 \times l_{\text{câble déployé}}$$

Q23. Expliquer, en observant la figure 11 et le DT2, comment est calculée la masse d'air déplacée par le ballon.

Elle est calculée à partir de la masse volumique de l'air multipliée par le volume d'air déplacé, donc le volume du ballon ($10,5 \text{ m}^3$ pour un ballon de type gélule 3).

Q24. Indiquer, en observant la figure 11 et le DT2, le rôle de l'élément nommé « Masse_en_altitude »

« Masse_en_altitude » permet de calculer la somme de la masse du câble, de la masse de la caméra (qui est composée de celle de la caméra, ajoutée à celle de la nacelle et de différents accessoires) et de la masse du ballon, soit la somme de toutes les masses en élévation au-dessus du sol.

Q25. 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.

Les résultats de simulation fournies permettent de calculer le courant moyen (soit 0,825 A) sur une durée de descente (de 1950 m à 1800 m) de 150 secondes.

Donc, l'énergie consommée pendant une descente du ballon est :

$$\Delta E = U \cdot \bar{I}_{descente} \cdot \Delta t = 12 \times 0,825 \times 150 = 1\,485 \text{ J}$$

Q26. En déduire le nombre de montées et de descentes possibles entre deux recharges de batterie lorsque le ballon est utilisé en altitude.

La somme des énergies consommées pendant une phase de montée et de descente est donc égale à 2 385 joules. Ce qui donne un total de :

$$194\,400 / 2\,385 \approx 81 \text{ montées et descentes.}$$

Q27. Conclure sur l'hypothèse de départ concernant l'amélioration de l'autonomie en altitude.

La modélisation multiphysique a montré qu'il était possible de réaliser environ 81 montées et descentes en altitude. Cette valeur est très supérieure aux essais réalisés en plaine, et montre que l'hypothèse de départ est valide : en effet, la pression atmosphérique, plus faible en altitude, a bien une influence sur la traction du ballon.

Mais, en réalité, comme ce fut le cas pour les mesures (35 allers et retours réels contre 40 en théorie), il n'est pas souhaitable de considérer ce résultat de simulation comme le nombre réel d'allers et retours du ballon en altitude. Les simplifications du modèle entraînent inévitablement un écart entre les valeurs simulées et les valeurs réelles.

Q28. Déterminer l'ensemble des paramètres à passer à l'instruction OPENCOM.

Les paramètres successifs à passer à l'instruction OPENCOM sont les suivant :

- 1 pour le canal 1 ;
- 4800 pour le débit en bits/s ;
- 3 (soit 11 en binaire), pour le format de 8 bits avec un bit de stop, sans parité ;
- 50 octets pour le buffer de réception ;
- 0 octets pour le buffer d'émission.

L'instruction complète est donc la suivante : **OPENCOM 1,4800,3,50,0**

Q29. Compléter l'écriture de cet algorithme afin d'extraire et d'afficher la longitude.

```
reception ← ""           // initialisation de la variable reception avec une chaîne vide
reception ← serie(1,1)    // lecture de la virgule
longitude ← ""           // initialisation de la variable longitude avec une chaîne vide
longitude ← serie(1,12)  // lecture de la chaîne de caractères relative à la longitude
afficher (longitude,2)  // affichage de la longitude sur la deuxième ligne de l'afficheur
```

Q30. Résumer, en cinq lignes au maximum, la démarche qui a permis d'arriver à une solution exploitable en altitude élevée.

La solution pour répondre au besoin s'est rapidement portée sur un ballon gélule avec treuil dorsal. Un calcul de portabilité nous a alors amené à choisir un ballon plus volumineux. Une simulation nous a ensuite permis de montrer que l'autonomie de la batterie était augmentée en altitude, comparativement aux mesures et essais réalisés en plaine. L'interfaçage d'un GPS a enfin permis de localiser précisément l'étude thermographique.