Système d'aide à la navigation aérienne

Bac S 2015 Centres étrangers (ancien programme) · Exercice 2 **10 points** **Durée conseillée 1 h 40**

1.1 Représenter les éléments de la chaîne de transmission d'information entre le VOR Doppler et l'avion, en identifiant l'émetteur, le canal de transmission et le récepteur.

- Émetteur : les antennes F et M du VOR Doppler.
- Canal de transmission : l'atmosphère, où se propage une onde électromagnétique.
- Récepteur : l'antenne et le récepteur de bord de l'avion.

Émetteur (VOR Doppler) → canal (atmosphère) → récepteur (avion).

COMPRENDRE
La chaîne de transmission et la modulation relevaient du programme de Terminale S ; elles ne sont plus étudiées sous cette forme dans la spécialité actuelle. L'effet Doppler (partie 2) reste au programme.



1.1 · Chaîne de transmission entre le VOR Doppler et l'avion

1.2 S'agit-il d'une transmission guidée ou libre ? Justifier.

L'onde électromagnétique se propage dans l'air, dans toutes les directions : aucun support matériel (câble, fibre optique) ne la conduit jusqu'à l'avion.

La transmission est **libre**.

1.3.1 Le signal émis par l'antenne F est-il analogique ou numérique ? Justifier.

La tension varie de façon continue au cours du temps : entre ses valeurs extrêmes, elle peut prendre n'importe quelle valeur. Un signal numérique ne prendrait qu'un nombre fini de valeurs, par paliers.

Le signal émis est **analogique**.

1.3.2 Montrer que le signal modulant a une fréquence égale à 30 Hz.

Données utiles enregistrement du signal modulé (axe des temps gradué de 0 à 0,12 s)

Dans une modulation d'amplitude, l'enveloppe du signal modulé reproduit le signal modulant : les deux ont la même période T.

Entre le premier et le quatrième maximum de l'enveloppe, on lit trois périodes : $3T = 0{,}10$ s.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{3}{0{,}10} = 30 \text{ Hz}$$

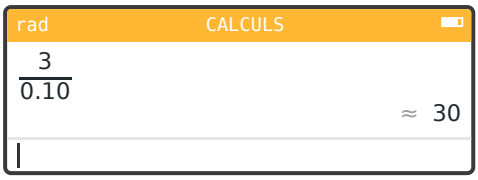
$f = 30$ Hz : on retrouve la fréquence du signal modulant annoncée par le document 2.

PIÈGE
Mesurer la période des oscillations rapides : c'est celle de la porteuse (113 MHz), invisible à cette échelle. Le signal modulant se lit sur l'enveloppe.

COMPRENDRE
La durée est lue avec deux chiffres significatifs : le résultat en garde deux, soit 30 Hz.

MÉTHODE
Mesurer plusieurs périodes puis diviser : l'incertitude de lecture est répartie sur trois périodes au lieu d'une seule.

À LA CALCULATRICE



1.4 Quel devrait être l'ordre de grandeur de la taille d'une antenne destinée à capter une onde électromagnétique de fréquence 30 Hz ? De fréquence 113 MHz ? Conclure.

Données utiles $c = 3{,}0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $f_0 = 113 \text{ MHz} = 113 \times 10^6 \text{ Hz}$

D'après le document 3, la taille de l'antenne est de l'ordre de la longueur d'onde du signal à capter. Pour une onde électromagnétique dans l'air : $\lambda = \dfrac{c}{f}$.

Pour $f = 30$ Hz : $\lambda = \dfrac{3{,}0 \times 10^8}{30} = 1{,}0 \times 10^7$ m, soit un ordre de grandeur de 10^7 m.

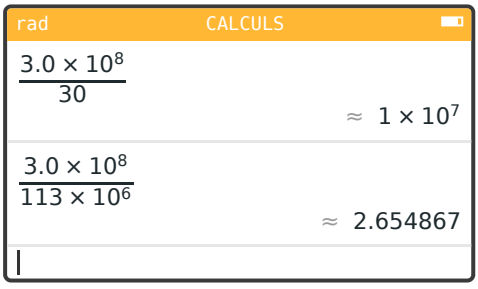
Pour $f_0 = 113$ MHz : $\lambda_0 = \dfrac{3{,}0 \times 10^8}{113 \times 10^6} = 2{,}7$ m, soit un ordre de grandeur de 1 m.

Antenne de l'ordre de 10^7 m à 30 Hz (irréalisable), de l'ordre de 1 m à 113 MHz : le signal à 30 Hz doit être porté par une onde de haute fréquence, d'où la modulation.

PIÈGE
Laisser la fréquence en MHz : $113 \text{ MHz} = 113 \times 10^6$ Hz. « Conclure » demande de relier le résultat à l'intérêt de la modulation.

COMPRENDRE
Ordre de grandeur : la puissance de dix la plus proche. Comme $2{,}7 < 3{,}16$, on retient $10^0 \text{ m} = 1 \text{ m}$.

À LA CALCULATRICE



2.1 Sur quel radial se trouve l'avion de la figure de l'annexe ?

L'avion est au sud de la station : la demi-droite qui va de la station à l'avion fait un angle $\theta = 180^\circ$ avec la direction du Nord magnétique.

L'avion se trouve sur le **radial 180**.

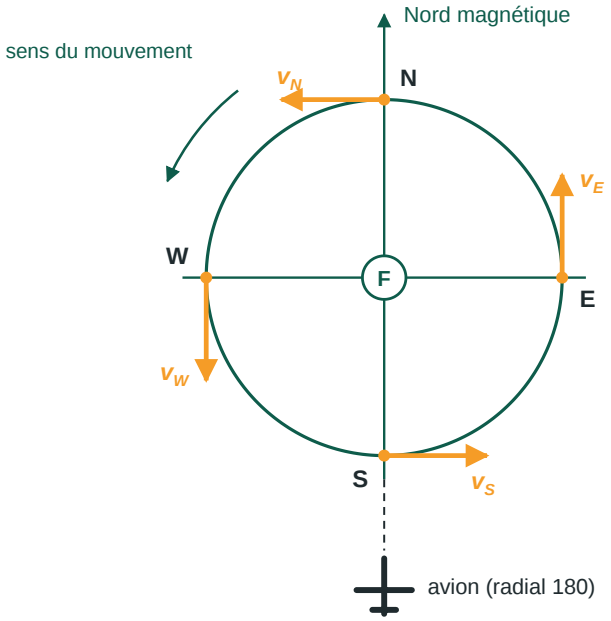
PIÈGE
Le radial se repère depuis la station vers l'avion, pas selon le sens de vol : l'avion vole ici vers le nord, mais il est sur le radial 180.

2.2 Sur le document-réponse, représenter, sans souci d'échelle, les vecteurs vitesse de l'antenne M lors de son passage aux points N, W, S, E.

Le mouvement de M est circulaire : en chaque point, le vecteur vitesse est tangent au cercle (perpendiculaire au rayon) et orienté dans le sens du mouvement. Le mouvement est uniforme (30 tours par seconde) : les quatre vecteurs ont la même longueur.

Vitesse dirigée vers l'ouest en N, vers le sud en W, vers l'est en S, vers le nord en E (voir l'annexe complétée).

PIÈGE
Tracer un vecteur le long du rayon ou dans le sens des aiguilles d'une montre. La flèche de l'annexe impose le sens N → W → S → E.



2.2 · Annexe complétée : vecteurs vitesse de l'antenne M en N, W, S et E

2.3 Pour les quatre points N, W, S, E, dire si le décalage en fréquence Δf est nul, positif ou négatif.

Données utiles $\Delta f = \frac{V_r}{c} f_{\text{source}}$; avion sur le radial 180 (Q2.1)

c et f_{source} sont positives : Δf a le signe de V_r, composante de la vitesse de M selon la direction de visée (ici nord-sud). D'après le schéma du document 2, V_r est positive quand l'antenne se rapproche de l'avion.

- En N et en S : vitesse perpendiculaire à la direction de visée, $V_r = 0$, donc $\Delta f = 0$.
- En W : vitesse dirigée vers le sud, vers l'avion, $V_r > 0$, donc $\Delta f > 0$.
- En E : vitesse dirigée vers le nord, à l'opposé de l'avion, $V_r < 0$, donc $\Delta f < 0$.

$\Delta f = 0$ en N et en S ; $\Delta f > 0$ en W ; $\Delta f < 0$ en E.

PIÈGE
Raisonner sur la distance entre M et l'avion : en S, l'antenne est au plus près de l'avion, mais elle ne s'en rapproche ni ne s'en éloigne. Seule la vitesse compte.

COMPRENDRE
C'est l'effet Doppler : quand la source se rapproche du récepteur, la fréquence reçue est plus grande que la fréquence émise ; quand elle s'éloigne, elle est plus petite.

2.4 Décrire qualitativement la variation de Δf, en signe et en amplitude, au cours d'une rotation complète de l'antenne M. Justifier que Δf évolue de façon périodique, à une fréquence de 30 Hz indépendante de la vitesse de l'avion.

Sur un tour, à partir de N :

- de N à W, Δf est positif et croît de 0 à sa valeur maximale, atteinte en W ;
- de W à S, il reste positif et décroît jusqu'à 0 ;
- de S à E, il est négatif et décroît jusqu'à sa valeur minimale, opposée à la valeur maximale ;
- de E à N, il reste négatif et revient à 0.

L'antenne M tourne à vitesse constante, à raison de 30 tours par seconde. À chaque tour, sa vitesse reprend les mêmes directions, donc Δf reprend les mêmes valeurs : Δf est périodique, de période $T = \frac{1}{30}$ s, la durée d'un tour.

Cette période est imposée par la seule rotation de l'antenne. Pendant un tour, le mouvement de l'avion ne change pratiquement pas : il ajoute à V_r un terme constant, qui décale les valeurs de Δf sans modifier leur période.

Δf oscille entre deux valeurs opposées à la fréquence de rotation de l'antenne, $f = 30$ Hz, quelle que soit la vitesse de l'avion.

COMPRENDRE
L'avion est très loin de la station par rapport au rayon du cercle (6,76 m) : la direction de visée est la même pour toutes les positions de M.

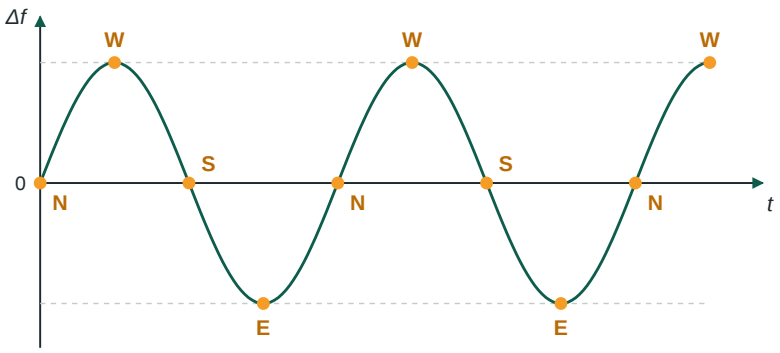
2.5 Compléter la figure du document-réponse donnant l'évolution de Δf en fonction du temps, en plaçant les points correspondant aux positions N, S, E, W de l'antenne M.

D'après la question 2.3 :

- W : Δf maximal, aux sommets de la courbe ;
- E : Δf minimal, aux creux ;
- N : $\Delta f = 0$ juste avant un maximum (l'antenne va vers W), là où la courbe coupe l'axe en montant ;
- S : $\Delta f = 0$ juste avant un minimum, là où la courbe coupe l'axe en descendant.

Le long de la courbe, on lit N, W, S, E, puis de nouveau N, tous les quarts de période (voir l'annexe complétée).

PIÈGE
Confondre N et S : les deux annulent Δf. On les distingue par le sens de variation de la courbe.



2.5 · Annexe complétée : positions de l'antenne M sur la courbe de Δf

3.1 L'antenne M, initialement au point N, se déplace jusqu'en W. Montrer que pour deux avions, l'un au radial 360, l'autre au radial 090, l'évolution des valeurs de Δf est nécessairement différente.

En N, la vitesse de M est dirigée vers l'ouest ; en W, vers le sud.

Avion 1, au radial 360 (au nord de la station, visée nord-sud) :

- en N, vitesse perpendiculaire à la direction de visée : $\Delta f = 0$;
- en W, vitesse dirigée à l'opposé de l'avion : Δf négatif et minimal.

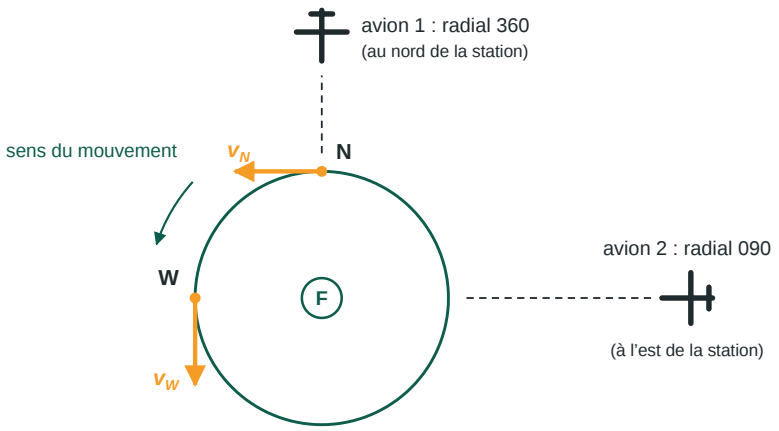
Avion 2, au radial 090 (à l'est de la station, visée est-ouest) :

- en N, vitesse dirigée à l'opposé de l'avion : Δf négatif et minimal ;
- en W, vitesse perpendiculaire à la direction de visée : $\Delta f = 0$.

Pendant le même quart de tour, Δf décroît de 0 à son minimum pour l'avion au radial 360, et croît de son minimum à 0 pour l'avion au radial 090 : les deux évolutions sont différentes.

COMPRENDRE
Pour l'avion au radial 360, Δf part de 0 et décroît, comme le signal de référence de la figure du sujet : les deux signaux sont bien en phase.

MÉTHODE
Pour chaque avion : tracer la direction de visée, puis regarder si la vitesse de M pointe vers l'avion ($\Delta f > 0$), à l'opposé ($\Delta f < 0$) ou perpendiculairement ($\Delta f = 0$).



3.1 · Antenne M allant de N vers W, vue par deux avions

3.2 Le récepteur de l'avion extrait les signaux 1 et 2 représentés. Justifier que l'avion est sur le radial 090 en direction du VOR Doppler.

Le signal 2 (référence) part de 0 et décroît, comme sur la figure précédente : son origine correspond au passage de M en N, et son premier minimum, un quart de période plus tard, au passage en W.

Le signal 1 n'est plus en phase avec lui : à l'origine, Δf est à sa valeur minimale, puis il croît et s'annule quand le signal 2 atteint son minimum. C'est l'évolution trouvée à la question 3.1 pour l'avion situé à l'est de la station.

Δf passe de son minimum à 0 pendant que M va de N à W : l'avion est sur le **radial 090**.

PIÈGE
Se contenter de « décalés d'un quart de période » : c'est aussi vrai au radial 270. Mais là, en N, la vitesse pointerait vers l'avion et Δf serait maximal à l'origine.

COMPRENDRE
Un quart de période correspond à un quart de tour de l'antenne, soit 90° : le décalage entre les deux signaux, exprimé en degrés, donne directement le numéro du radial.

3.3 Calculer la vitesse qu'aurait l'antenne M dans le référentiel terrestre si elle était mécaniquement mobile. Commenter.

Données utiles rayon du cercle $R = 6{,}76\ \text{m}$; 30 tours par seconde

En $\Delta t = 1\ \text{s}$, l'antenne parcourrait $n = 30$ fois le périmètre $2\pi R$ du cercle :

$$v = \frac{n \times 2\pi R}{\Delta t} = \frac{30 \times 2\pi \times 6{,}76}{1} = 1{,}3 \times 10^{3}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Cette vitesse vaut près de quatre fois la célérité du son dans l'air (environ $340\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Aucun bras mécanique de près de 7 m ne peut tourner ainsi : c'est pourquoi le mouvement est simulé électroniquement.

$v = 1{,}3 \times 10^{3}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$: vitesse irréaliste pour une antenne réellement mobile.

COMPRENDRE

Deux chiffres significatifs, comme la fréquence de rotation (30 tours par seconde). En pratique, des antennes fixes disposées en cercle émettent tour à tour, ce qui reproduit une source qui tourne.

À LA CALCULATRICE

