

## Le GPS

ou

### Comprendre le principe de géolocalisation par satellite

**Résumé :** Scénario d'activité débranchée et ressources diverses permettant de faire comprendre le principe de géolocalisation par satellites.

**Thématique :** Localisation, cartographie et mobilité

**Point du programme traité :**

**Contenus :** GPS, Galileo

**Capacités attendues :** Décrire le principe de fonctionnement de la géolocalisation.

**Lieu de l'activité :** En salle de classe ordinaire – activité débranchée

**Matériels utilisés :** Papier – Crayon – Compas ;  
Utilisation éventuelle d'un poste informatique avec Géogebra

**Durée de l'activité :** 1h environ

**Plan de la ressource :**

- 1) Introduction : usage courant et problématique
- 2) Repérer un point en 2D  
Exercice 1 : Retrouver un point sur une carte
- 3) Du temps à la distance  
Exercice 2 : Calculer une distance à partir d'un temps et d'une vitesse
- 4) Repérer un point en 3D
- 5) Au sujet de la précision des mesures  
Exercice 3 : Impact de la précision de l'horloge sur la qualité de la géolocalisation
- 6) Pour aller plus loin sur la précision
- 7) Deux vidéos ressources résumant le principe de la géolocalisation
- 8) Mémento : les notions à retenir
- 9) Lien avec PIX pour la certification des compétences numériques
- 10) Annexe – Une fiche élève et une organisation possible : l'essentiel en deux pages

## 1) Introduction : usage courant et problématique

Pour se repérer lors d'une randonnée, pour trouver son chemin avec les transports en commun, pour repérer un bateau en mer, pour calculer un itinéraire en voiture... on utilise souvent une application couplée au système GPS (et bientôt à Galiléo).

Ce système de géolocalisation par satellites permet de repérer un objet appelé « récepteur » et d'indiquer sa position sur une carte.

Mais comment fonctionne la géolocalisation par satellite ?

## 2) Repérer un point en 2D

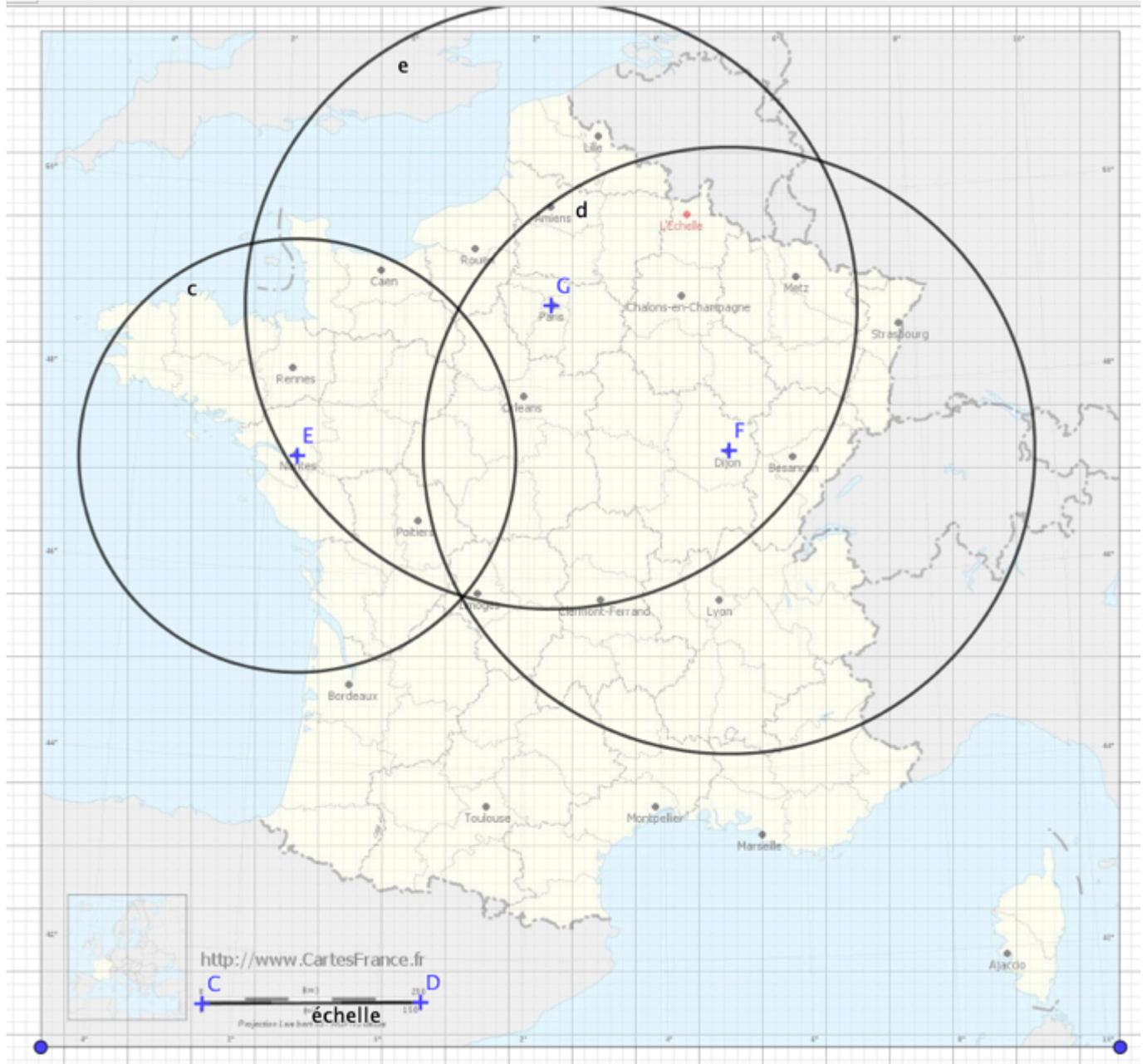
Pour comprendre le principe de géolocalisation d'un point sur Terre par un ensemble de satellites, commençons par une petite activité en 2 dimensions :

Exercice 1 : Sur la carte ci-dessous, dont l'échelle est précisée, on a caché un trésor à 250 km de Nantes.

- Peut-on le localiser avec certitude ? Pourquoi ?
- On sait que le trésor est à 350 km de Dijon. Peut-on le localiser avec certitude ? Pourquoi ?
- On sait que le trésor est aussi 350 km de Paris. Peut-on le localiser avec certitude ? Pourquoi ?



Fichier géogébra annexe à disposition :



Il faut donc 3 renseignements de distances pour localiser un point avec certitudes sur la carte.

La géolocalisation par satellite fonctionne à l'aide d'un principe similaire appelé **la trilatération** (principe proche de la *triangulation*, mais n'utilisant qu'un calcul de distances, sans calcul d'angles) en cherchant à connaître la distance d'un récepteur par rapport à 3 satellites (ou plutôt 4 satellites – voir plus loin) dont on connaît la position.

Il existe cependant quelques différences ou problèmes par rapport à l'activité précédente menée dans un plan :

- Comment connaître la distance du récepteur par rapport aux satellites visibles ?
- Que change-t-on fait d'être en 3 dimensions (dans l'espace) et pas en 2 dimensions (dans un plan) ?
- Comment régler le problème de la précision des mesures ?

### 3) Du temps à la distance

Le GPS fonctionne avec une constellation de **30 satellites en orbite** autour de la Terre. Chaque satellite envoie sur Terre des signaux qui comportent :

- la position dans l'espace du satellite
- l'heure et la date d'émission du signal

La puce GPS (« récepteur »), se contente de capter ces signaux et en comparant l'heure d'émission du signal avec son horloge interne, elle est capable de connaître le temps mis par le signal pour venir à elle. C'est ce temps de parcours du signal qui est la clé du calcul de distance, puisque la vitesse de voyage du signal est celle de la lumière : 300 000 km/s soit  $3 \times 10^8$  km/s.

**Exercice 2 : Calculer une distance à partir d'un temps et d'une vitesse**

- a) Si un signal met 78,5 ms pour aller du satellite au récepteur, à quelle distance du satellite se trouve le récepteur ?

Réponse :  $d = v \times t = 78,5 \times 10^{-3} \times 3 \times 10^8 = 23\,550$  km

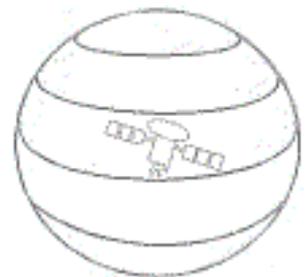
- b) Un signal émis à 18 h 35 min 24,525 800 s est capté par un récepteur GPS à 18 h 35 min 24,593 650 s. A quelle distance du satellite se trouve le récepteur ?

Réponse :  $18\text{ h }35\text{ min }24,593\,650\text{ s} - 18\text{ h }35\text{ min }24,525\,800\text{ s} = 67,850 \times 10^{-3}\text{ s}$   
 $d = v \times t = 67,850 \times 10^{-3} \times 3 \times 10^8 = 20\,355$  km

Ainsi, lorsque le récepteur capte 3 satellites, dont il connaît la position dans l'espace, il pourrait déterminer sa propre position. Mais attention, on se trouve dans l'espace, pas dans un plan. On utilise donc des sphères à la place des cercles : à l'intersection de deux sphères correspond à un cercle, et l'intersection de 3 sphères correspond à deux points.

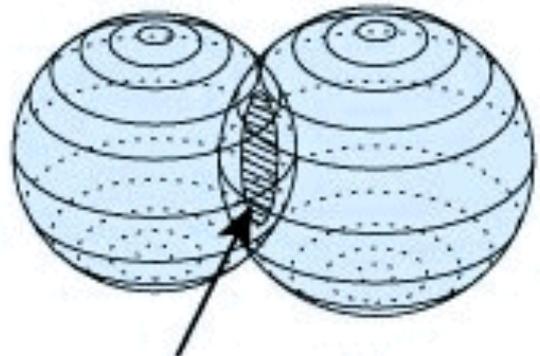
### 4) Repérer un point en 3D

On considère la distance  $d$  séparant un satellite d'un récepteur GPS. Sachant que le satellite a une position  $X$  précise et définie dans un espace à 3 dimensions, l'ensemble des points possibles où pourrait se situer l'utilisateur du GPS est la sphère de centre le satellite et de rayon la distance  $d$ .



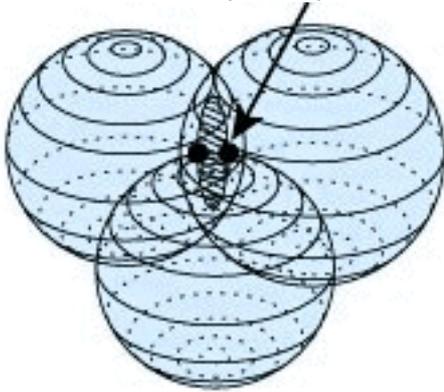
De la même manière on fait intervenir un deuxième satellite qui connaît la distance le séparant du récepteur GPS.

L'intersection des deux sphères forme un cercle.



Ce cercle représente l'ensemble des positions que peut avoir le récepteur GPS.

Mais la précision du satellite n'étant pas suffisante avec 2 on se sert d'un troisième satellite. La démarche est identique aux 2 précédents satellites. On obtient alors 2 points possibles.



En théorie il nous faut donc un quatrième satellite pour savoir où on se trouve. Dans le cas où l'utilisateur se situe à la surface de la Terre seul un des 2 points est cohérent. Ainsi on peut déduire sa position exacte en éliminant le point donnant un résultat incohérent. Trois satellites suffiraient donc pour connaître notre position sur le globe.

## 5) Au sujet de la précision des mesures

Cependant, pour la synchronisation de l'horloge du boîtier GPS, il faut la précision d'une horloge atomique. Le récepteur GPS n'a pas cette précision.

Il va donc utiliser l'horodatage produite par une horloge atomique à bord d'un quatrième satellite.

**Pour pouvoir utiliser le GPS, il faut donc un minimum de quatre satellites : trois pour la position, et un supplémentaire pour la synchronisation.**

La nécessité des horloges atomiques vient du fait qu'on cherche à avoir une précision très importante sur la position : de l'ordre de quelques mètres sur la surface de la Terre. Il faut donc une très grande précision dans les informations transmises à votre boîtier GPS.

**Exercice 3 : Impact de la précision de l'horloge sur la qualité de la géolocalisation.**

**Si l'horloge interne de votre GPS a une précision de l'ordre de la microseconde, quelle sera la précision de votre GPS ?**

Réponse : en une microseconde ( $1 \times 10^{-6}$  s), le signal envoyé par le satellite parcourt une distance de  $d = v \times t = 1 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^8 = 0,3$  km soit 300 m

Une différence d'une microseconde correspond à une erreur de 300 mètres sur la position !

## 6) Pour aller plus loin sur la précision

La précision demandée est telle que des **phénomènes relativistes** (d'habitude négligées) sont à corriger ! Il y en a deux principaux :

- le premier est dû à la vitesse de déplacement très grande (14 000 km/h) des satellites : leurs référentiels de temps et d'espace sont différents du nôtre (sur Terre). Leurs horloges sont ainsi retardées de 7  $\mu$ s par jour.
- Le second provient de la différence dans le champ gravitationnel terrestre auquel les satellites sont soumis, du fait de leur altitude élevée (20 200 km). La relativité implique que l'écoulement du temps est accéléré si le champ gravitationnel diminue. On parle ici de 45  $\mu$ s par jour pour le satellite.

Ces deux effets cumulés produisent donc un décalage de 38  $\mu$ s quotidiennement (+45-7=38  $\mu$ s). Ça semble peu, mais ça suffit à induire une erreur sur la position du satellite supérieure à 11 km. Les corrections relativistes sont donc à compenser pour que le système GPS soit fonctionnel. Il s'agit là également d'un élément de preuve que la théorie d'Einstein fonctionne : la désynchronisation mesurée sur les horloges en orbite sont conformes aux prédictions théoriques, et si ces erreurs n'avaient pas été prises en compte (si on avait utilisé un système sans corrections), le système GPS serait dérégulé et inopérant.

### Les autres sources d'erreurs et d'imprécision :

En dehors de la dégradation volontaire du signal par les militaires américains, il existe des facteurs dits "naturels" qui limitent la précision du GPS. Nous pouvons citer dans l'ordre de leur influence sur la perte de précision: la réfraction dans l'ionosphère, la réfraction dans la troposphère et la précision du positionnement des satellites GPS.

#### - la réfraction dans l'ionosphère

L'ionosphère est une enveloppe constituée de particules chargées (des ions) qui entourent la Terre à près de 20 km d'altitude. L'onde porteuse du signal GPS doit pénétrer dans cette couche sur son trajet. Le fait que cette couche ne soit pas neutre, au niveau de sa charge, entraîne une perturbation de la vitesse de l'onde électromagnétique qui se propage. L'amplitude de cette imprécision est liée à la longueur d'onde et à la densité de particules chargées dans le milieu traversé, laquelle densité est évidemment inconnue et variable dans le temps et dans l'espace. Le temps mis par l'onde GPS est modifié d'une durée inconnue, nommé délai ionosphérique. L'évaluation de la distance entre le satellite et la station sera faussée, la précision est donc diminuée par ce premier phénomène. Dans le cas d'une ionosphère très agitée, lors d'une tempête solaire par exemple, l'évaluation du délai ionosphérique ne sera qu'approximative et la mesure de la position imprécise.

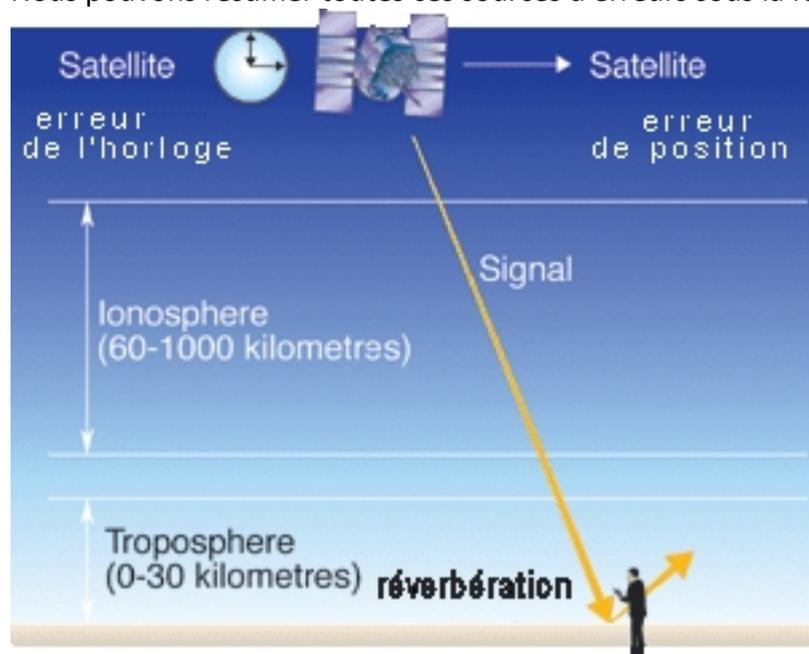
#### - La réfraction dans la troposphère

De la même façon, le temps de propagation de l'onde GPS est affecté par la teneur en vapeur d'eau de la couche basse de l'atmosphère (de 0 à 10 km d'altitude) : la troposphère. Il est nécessaire de connaître cette teneur avec précision tout le long du trajet de l'onde. En pratique cela se révèle très difficile, sinon impossible. En effet, le retard provoqué est plus compliqué qu'un simple rapport de proportionnalité avec le pourcentage de vapeur d'eau. Ce problème est d'autant plus important que les conditions météorologiques et les épaisseurs troposphériques diffèrent entre deux stations. Cette erreur de position se retrouvera plus particulièrement sur la composante verticale, les erreurs horizontales se compensant plus ou moins du fait que les satellites couvrent à peu près toutes les directions l'horizon. Il existe une recherche portant sur des instruments permettant de mesurer directement la teneur en vapeur d'eau le long du trajet suivi par l'onde GPS ; mais ils sont en phase expérimentale.

### - La précision des orbites des satellites GPS

Il est évident que si il y a une erreur sur la position du satellite émetteur, cette erreur va se répercuter directement sur la position affichée par le récepteur. La distance entre deux stations (ligne de base). L'orbite des satellites GPS peut être calculée très précisément, mais elle est rendue publique par les militaires américains avec une précision de l'ordre de 200 m. Sur 20 000 km cela donne une erreur de 10 cm sur une ligne de base de 10 km ! Cette erreur est handicapante pour les domaines réclamant une grande précision, notamment dans le domaine de la surveillance de plaques tectoniques.

Nous pouvons résumer toutes ces sources d'erreurs sous la forme du schéma suivant:

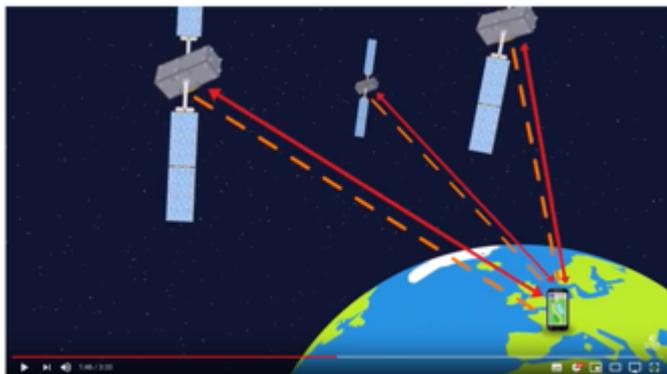


Enfin, pour terminer, ajoutons que le système GPS est américain et est géré par le département de la défense des USA. L'usage de ce système par tous les autres pays que les États-Unis est souvent considéré comme une dépendance qui ne plaît pas toujours (pour des raisons géopolitiques).

Ainsi, différents états prévoient leur propre système de positionnement par satellite :

- La Russie a son système *Glonass* ;
- L'Europe met actuellement en place les satellites du système *Galileo*.
- La Chine a son système *Beidu*
- L'Inde et le Japon ont également en projet leur système régional.

## 7) Deux vidéos ressources résumant le principe de la géolocalisation



<https://youtu.be/e79tSlpLiDk>

Vidéo issue de la chaîne YouTube [CNES](#), Centre National d'Études Spatiales



<https://youtu.be/WoqpQbWdacQ>

Vidéo issue de la chaîne YouTube [Unisciel](#) (Groupement d'Intérêt Scientifique pour l'enseignement des Sciences)

## 8) Mémento : les notions à retenir

**Géolocalisation** : procédé permettant de positionner un objet, un véhicule, ou une personne sur un plan ou une carte à l'aide de ses coordonnées géographiques.

**Géolocalisation par satellites** : procédé consistant à calculer, grâce aux signaux émis par une constellation de satellites prévue à cet effet, la position actuelle sur la face terrestre d'un terminal équipé d'une puce compatible. Cette position est traduite en termes de latitude, longitude et parfois altitude.

**GPS** : Global Positioning System (en français : « Système mondial de positionnement » ou « Géopositionnement par satellite »). C'est un système de positionnement par satellites mis en place par les États-Unis à des fins militaires à partir de 1973. Le système avec 24 satellites est totalement opérationnel en 1995 et s'ouvre au civil en 2000.

**Galileo** : système de positionnement par satellites développé par l'Union européenne et incluant un segment spatial dont le déploiement doit s'achever vers 2020. Il permet à un utilisateur muni d'un terminal de réception d'obtenir sa position. La précision attendue pour le service de base, gratuit, est de 4 mètres horizontalement et de 8 mètres en altitude.

**Trilatération** : méthode mathématique permettant de déterminer la position relative d'un point en utilisant la géométrie des triangles tout comme la triangulation. Mais contrairement à cette dernière, qui utilise les angles et les distances pour positionner un point, la trilatération utilise les distances entre un minimum de deux points de référence.

## 9) Lien avec PIX pour la certification des compétences numériques

*Avant propos : Pix est un service public en ligne de mesure, de développement et de certification des compétences numériques, accessible à l'adresse <https://pix.fr>*

*Il s'adresse à tous les collégiens, lycéens, étudiants mais aussi à n'importe quel professionnel ou citoyen. Sa mission est de permettre à chacun de cultiver ses compétences numériques tout au long de la vie et ne laisser personne au bord du chemin de la transformation numérique de la société.*

Le travail présenté ici autour de la thématique Localisation, cartographie et mobilité permet de développer des compétences référencées sur la plateforme PIX, en particulier dans les champs de compétences suivants :

### **1. Informations et données**

1.2. Gérer des données : Stocker et organiser des données pour les retrouver, les conserver et en faciliter l'accès et la gestion (avec un gestionnaire de fichiers, un espace de stockage en ligne, des tags, des classeurs, des bases de données, un système d'information, etc.).

### **4. Protection et sécurité**

4.2. Protéger les données personnelles et la vie privée : Maîtriser ses traces et gérer les données personnelles pour protéger sa vie privée et celle des autres, et adopter une pratique éclairée (avec le paramétrage des paramètres de confidentialité, la surveillance régulière de ses traces par des alertes ou autres outils, etc.).



## Le GPS ou Comprendre le principe de géolocalisation par satellite

**Exercice 1 :** Sur la carte ci-dessous, dont l'échelle est précisée, on a caché un trésor à 250 km de Nantes.



- Peut-on le localiser avec certitude ? Pourquoi ?
- On sait que le trésor est à 350 km de Dijon. Peut-on le localiser avec certitude ? Pourquoi ?
- On sait que le trésor est aussi 350 km de Paris. Peut-on le localiser avec certitude ? Pourquoi ?

**Exercice 2 :** Calculer une distance à partir d'un temps et d'une vitesse

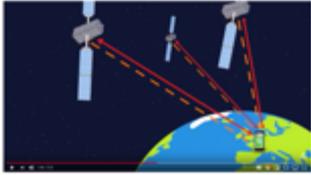
- Si un signal met 78,5 ms pour aller du satellite au récepteur, à quelle distance du satellite se trouve le récepteur ?

b) Un signal émis à 18 h 35 min 24,525 800 s est capté par un récepteur GPS à 18 h 35 min 24,593 650 s. A quelle distance du satellite se trouve le récepteur ?

**Exercice 3 : Impact de la précision de l'horloge sur la qualité de la géolocalisation.**

Si l'horloge interne de votre GPS a une précision de l'ordre de la microseconde, quelle sera la précision de votre GPS ?

**Exercice 4 : Deux vidéos expliquant le principe de la géolocalisation par satellites**



<https://youtu.be/e79tSlpLiDk>

Vidéo issue de la chaîne YouTube [CNES](#)



<https://youtu.be/WoqpQbWdacQ>

Vidéo issue de la chaîne YouTube [Unisciel](#)

*Résumé de ce que j'ai compris :*

**Mémento : les notions à retenir**

**Géolocalisation** : procédé permettant de positionner un objet, un véhicule, ou une personne sur un plan ou une carte à l'aide de ses coordonnées géographiques.

**Géolocalisation par satellites** : procédé consistant à calculer, grâce aux signaux émis par une constellation de satellites prévue à cet effet, la position actuelle sur la face terrestre d'un terminal équipé d'une puce compatible. Cette position est traduite en termes de latitude, longitude et parfois altitude.

**GPS** : Global Positioning System (en français : « Système mondial de positionnement » ou « Géopositionnement par satellite »). C'est un système de positionnement par satellites mis en place par les États-Unis à des fins militaires à partir de 1973. Le système avec 24 satellites est totalement opérationnel en 1995 et s'ouvre au civil en 2000.

**Galileo** : système de positionnement par satellites développé par l'Union européenne et incluant un segment spatial dont le déploiement doit s'achever vers 2020. Il permet à un utilisateur muni d'un terminal de réception d'obtenir sa position. La précision attendue pour le service de base, gratuit, est de 4 mètres horizontalement et de 8 mètres en altitude.

**Trilatération** : méthode mathématique permettant de déterminer la position relative d'un point en utilisant la géométrie des triangles tout comme la triangulation. Mais contrairement à cette dernière,

qui utilise les angles et les distances pour positionner un point, la trilatération utilise les distances entre un minimum de deux points de référence.