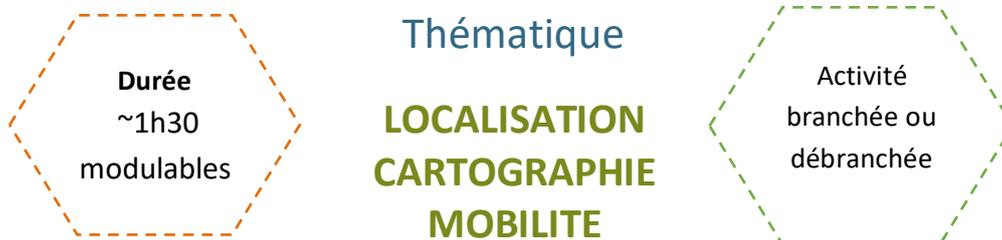


05. Comprendre le principe de la géolocalisation satellite



Description de l'activité

Dans cette activité, les élèves comprennent le principe de géolocalisation par satellite à l'aide d'activités débranchées.

Objectifs pédagogiques ou compétences

| Objectifs généraux | Objectifs intermédiaires | Compétences |
|-------------------------|--|--|
| Notions de cours | <ul style="list-style-type: none">- Latitude et longitude- Faire une représentation sur une carte- Rechercher des coordonnées GPS de lieux | <ul style="list-style-type: none">- Manipuler des repères- Comprendre une vidéo et en extraire les informations pertinentes |

Matériel et outils

- Fiche activité élève à imprimer
- Si besoin, 1 poste par élève pour visionner les vidéos

Tags

#géolocalisation ; #systèmeGPS ; #satellite ; #trilatération

Déroulé de l'activité

Introduction : (~20 minutes)

- Présenter les objectifs de la séance (contenu théorique et productions attendues) (2-3 minutes)
- Introduire la thématique : (~10 minutes)

Pour lancer la thématique, l'enseignant.e sépare la classe en binômes/petits groupes et l'enseignant.e leur laisse 5 min pour trouver des objets/logiciels/situations qui nécessitent d'utiliser le GPS. C'en suit un temps d'échange.

Étape 1 – Repérer un point en 2D (15 minutes)

- Avec une référence... (5 minutes)
- Avec deux références... (5 minutes)
- Et avec trois références ? (5 minutes)

Grâce à cet exercice de la FICHE ACTIVITE ELEVE, les élèves découvriront de manière concrète le principe de trilatération, que l'enseignant.e explique lors de la 3^e étape :

La géolocalisation par satellite fonctionne à l'aide d'un principe similaire appelé la trilatération : l'élève cherche à connaître la distance d'un récepteur par rapport à 3 satellites dont on connaît la position.

Étape 2 – Du temps à la distance... Un peu de calculs ! (15 minutes)

Ici, l'enseignant.e laisse d'abord les élèves faire les calculs, qu'on corrige. Ensuite, l'enseignant.e explique que 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. L'enseignant.e 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 (cf. étape 3).

Étape 3 – Repérer un point en 3D (15 minutes)

Ici, l'objectif est de vérifier que les élèves comprennent le texte, et de permettre à l'enseignant.e de se représenter concrètement ce qu'ils ont compris.

Étape 4 – Au sujet de la précision des mesures (10 minutes)

Ici, l'enseignant.e demande aux élèves d'effectuer un calcul en lien avec la précision, l'enseignant.e peut approfondir la question avec eux si besoin.

Étape 5 – Bilan (~40 minutes)

Les élèves visionnent en autonomie deux vidéos et répondent aux questions en lien. Ils peuvent ensuite, seuls ou en binôme, faire un résumé permettant d'expliquer le principe de géolocalisation par GPS.

Conclusion (20 minutes)

- **Bilan de la séance : (5 minutes)**

Pour clôturer la séance, l'enseignant.e peut revenir sur les principales difficultés rencontrées pendant l'activité. Éventuellement, il est possible de finir sur un court échange autour de :

- **L'omniprésence de la géolocalisation dans notre société (5 minutes)**

L'enseignant.e peut, dans un premier temps, demander aux élèves ce qu'on ne pourrait plus faire avec les objets qui ne fonctionneraient plus sans le GPS, puis discuter avec eux de comment sa démocratisation a modifié nos habitudes.

Pistes de discussion :

- Déplacements en voiture (mais pas que) : les systèmes de navigation GPS sont devenus indispensables pour trouver des directions précises.
- Les services de livraison en temps réel, tels que ceux proposés par Amazon, dépendent du GPS pour suivre la localisation des colis. On peut également penser à leur automatisation (par drones notamment) à venir.
- Les applications de coaching sportif utilisent également ces données.
- Navigation maritime : les navires utilisent le GPS pour naviguer en mer, assurant des trajets sûrs et précis.
- Agriculture de précision : l'agriculture moderne utilise le GPS pour optimiser la distribution d'engrais, d'eau et de pesticides, améliorant les rendements.
- Recherche et sauvetage : les équipes de recherche et de sauvetage utilisent le GPS pour localiser rapidement des personnes perdues ou en danger.
- Services de géolocalisation sur les réseaux sociaux : les applications comme Facebook et Instagram utilisent le GPS pour permettre aux utilisateurs de partager leur emplacement avec leurs amis.
- Suivi des animaux : les scientifiques utilisent le GPS pour suivre les mouvements et les comportements des animaux dans la nature.
- Surveillance environnementale : le GPS est utilisé pour surveiller les mouvements des plaques tectoniques et les changements dans les régions géologiques.
- Services de météo et de prévision : les données GPS sont utilisées pour améliorer la précision des prévisions météorologiques.

L'un des changements les plus évidents se trouve dans le domaine de la navigation. Grâce aux applications de navigation GPS intégrées aux smartphones et aux systèmes de navigation dans les véhicules, trouver des itinéraires précis et suivre les directions en temps réel sont devenues une tâche simple et accessible à tous. Les voyages ont également été transformés, permettant aux voyageurs de localiser rapidement des lieux d'intérêt, des restaurants et des hébergements, renforçant ainsi leur confiance et leur indépendance dans les environnements inconnus.

En-dehors de la navigation, le GPS a révolutionné la logistique et le transport. Les entreprises utilisent des systèmes de suivi GPS pour gérer efficacement leurs flottes de véhicules et optimiser les itinéraires de livraison. Cela a entraîné une amélioration significative de l'efficacité opérationnelle et une réduction des coûts. Le GPS a également renforcé la sécurité en permettant des interventions d'urgence plus rapides grâce à la localisation précise des personnes en danger, que ce soit en mer, en montagne ou dans des zones isolées.

- **Les métiers en lien (10 minutes)**

On peut également évoquer les principaux métiers en lien avec l'utilisation et le développement des technologies de géolocalisation pour rendre ce domaine plus concret pour les élèves. Voici quelques exemples :

Transport et logistique :

- **Ingénieur en gestion de la chaîne d'approvisionnement** : planifie et gère les opérations logistiques en utilisant des données de localisation pour optimiser l'efficacité.
- **Gestionnaire de flotte** : surveille et gère les véhicules d'une entreprise, utilisant le GPS pour suivre les itinéraires, la maintenance et la distribution.

Technologie de l'information :

- **Développeur d'applications de navigation** : crée des applications de navigation pour smartphones et dispositifs embarqués, en intégrant des fonctionnalités de géolocalisation et de cartographie.
- **Analyste SIG (Systèmes d'Information Géographique)** : collecte, analyse et visualise des données géospatiales pour des projets environnementaux, d'urbanisme ou de recherche.

Agriculture de précision :

- **Agronome de précision** : utilise les technologies GPS et de télédétection pour optimiser la gestion des cultures, la distribution d'engrais et d'eau, et maximiser les rendements.
- **Spécialiste en drones agricoles** : pilote des drones équipés de capteurs GPS pour collecter des données sur les champs et surveiller la santé des cultures.

Géodésie et topographie :

- **Géomètre-topographe** : effectue des relevés de terrain et des mesures de localisation précises pour des projets de construction, de cartographie ou d'aménagement.
- **Géodésien** : effectue des mesures de haute précision pour établir des références géodésiques et déterminer les coordonnées géographiques exactes.

Sécurité et urgence :

- **Coordinateur de gestion des urgences** : utilise les données de localisation pour coordonner les interventions d'urgence et aider les équipes de secours à atteindre les lieux rapidement.
- **Expert en recherche et sauvetage** : utilise des dispositifs GPS pour localiser et secourir les personnes perdues ou en détresse dans des environnements difficiles.

Environnement et gestion des ressources :

- **Spécialiste en suivi de la faune** : utilise des balises GPS pour suivre les mouvements et les comportements des animaux sauvages, contribuant ainsi à la conservation.
- **Analyste des ressources naturelles** : utilise les données GPS pour surveiller et gérer l'utilisation durable des ressources naturelles telles que les forêts et les ressources en eau.

Développement de jeux et de technologies immersives :

- **Concepteur de jeux en réalité augmentée** : intègre des données GPS pour créer des expériences de jeu interactives basées sur la localisation réelle des joueurs.
- **Développeur de réalité virtuelle** : utilise des informations GPS pour intégrer des éléments du monde réel dans des environnements virtuels.

Comprendre le principe de la géolocalisation satellite

Fiche activité - Correction

1. Étape 1 – Repérer un point en 2 dimensions

- Avec une référence ...

Par deux, vous devez retrouver un trésor avec pour seul indice ... Le fait qu'il se situe à 250km de Nantes.



- Où peut-il bien être ? Est-ce suffisamment précis pour le retrouver facilement ?

Pour le savoir, on trace un cercle d'un rayon de 125km autour de Nantes. On sait que le trésor se situe sur le trait, mais ce n'est pas assez précis, il faudrait fouiller toute la zone.

- Avec deux références ...

On vous donne un second indice : le trésor est également situé à 350 km de Dijon.

- Est-ce que cela facilite votre recherche ? Est-ce que cela vous permet pour autant de localiser le trésor avec précision ?

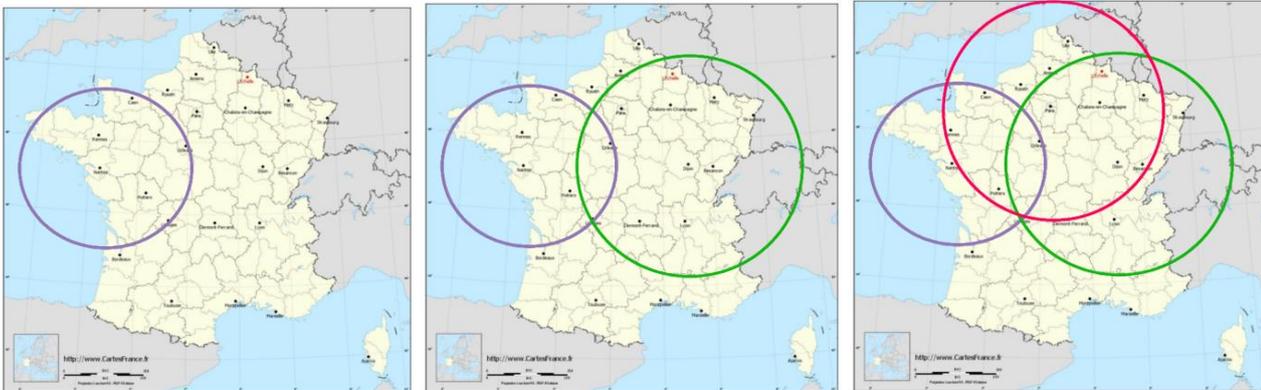
On réduit le nombre de possibilités à 2, à savoir les points d'intersection entre les deux cercles, mais cela reste insuffisant puis qu'on a deux endroits possibles.

- Et avec trois références ?

Un dernier indice ! On sait également que le trésor se situe à 350km de Paris.

- Est-ce que ce dernier indice suffit à localiser le trésor ? Quels obstacles voyez-vous à sa localisation précise ? N'oubliez pas que nous évoluons dans un environnement en 3 dimensions ... Et pensez à l'échelle de grandeur !

Résultat approximatif à cette étape :



Non, cela ne suffit pas : **on ne sait pas à quelle hauteur se situe le trésor** : en haut d'une colline, l'étage d'un immeuble, etc. En plus, en fonction de la taille de ce qu'on cherche, ce n'est pas dit que la localisation soit précise. Le point marquant l'intersection des 3 cercles ici est bien trop large, ce qui fait que la **marge est trop importante** pour localiser une rue ou un bâtiment donnés, et d'autant plus une personne ou un petit objet !

2. Étape 2 – Du temps à la distance ... Un peu de calculs !

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 3×10^8 km/s.

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

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

- 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 ?

$$18 \text{ h } 35 \text{ min } 24,593 \text{ 650 s} - 18 \text{ h } 35 \text{ min } 24,525 \text{ 800 s} = 67,850 \times 10^{-3} \text{ s}$$

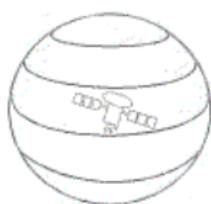
$$d = v \times t = 67,850 \times 10^{-3} \times 3 \times 10^8 = 20\,355 \text{ km}$$

3. Étape 3 – Repérer un point en 3D

Voici un court texte expliquant le fonctionnement de la localisation GPS. Par deux, et pour chaque étape, dessinez un schéma permettant de traduire le texte.

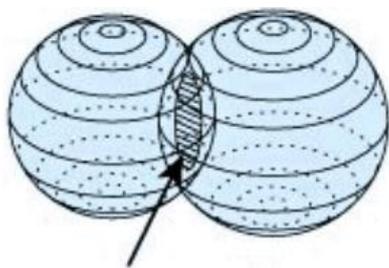
- On considère la distance d séparant un satellite d'un récepteur GPS. Sachant que le satellite a une position X précise et définie dans un espace à 3 dimensions, l'ensemble des points possibles où pourrait se situer l'utilisateur du GPS est la sphère dont le centre est le satellite et le rayon est la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

Correction :



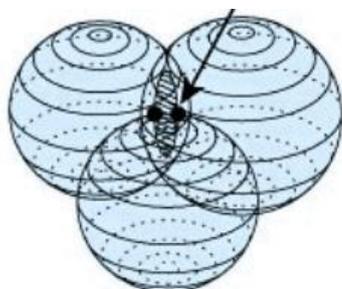
- De la même manière on fait intervenir un deuxième satellite qui connaît la distance le séparant du récepteur GPS. L'intersection des deux sphères forme un cercle. Ce cercle représente l'ensemble des positions que peut avoir le récepteur GPS.

Correction :



- 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.

Correction :



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.

4. Étape 4 – Au sujet de la précision des mesures

- **Une précision ... Relative**

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 produit 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.

- **À votre tour ! 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 ?

En une microseconde (1×10^{-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 !

- **Pour aller plus loin sur la précision**

La précision demandée est telle que des phénomènes relativistes (habituellement négligés) sont à corriger ! Il y en a deux principaux :

- **Le premier est dû à la vitesse de déplacement très élevée (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 μ s par jour.
- **Le second provient de la différence dans le champ gravitationnel terrestre auquel les satellites sont soumis**, en raison 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 μ s par jour pour le satellite.

Ces deux effets cumulés produisent donc un décalage de 38 μ s quotidiennement (+45-7=38 μ 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 nécessaires pour compenser ce décalage, afin 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 est conforme 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 :

Il y a des facteurs dits "naturels" qui réduisent la précision du GPS. Parmi ces facteurs, on peut mentionner, par ordre décroissant d'importance : 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, nommée 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.

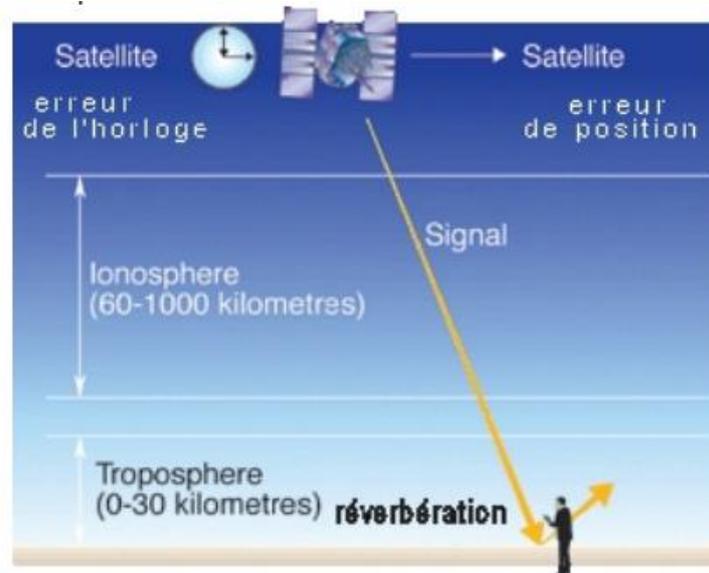
- **La réfraction dans la troposphère :**

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 au 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 de 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 s'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) est influencée par cela. 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 mètres. Sur 20 000 km, cela donne une erreur de 10 cm sur une ligne de base de 10 km ! Ce type d'erreur est problématique pour les domaines qui demandent une grande exactitude, comme dans le domaine de l'observation des plaques tectoniques.

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



Pour conclure, il faut savoir que le système GPS est un système américain contrôlé par le département de la défense des États-Unis. L'utilisation de ce système par tous les pays autres que les États-Unis est souvent perçue comme une dépendance qui pose problème (pour des raisons géopolitiques). C'est pourquoi différents États développent leur propre système de positionnement par satellite :

- La Russie dispose de son système Glonass.
- L'Europe est en train de lancer les satellites du système Galileo.
- La Chine possède son système Beidou.
- L'Inde et le Japon ont également prévu leur système régional.

5. Étape 5 – Pour résumer ...

Visionnez les vidéos suivantes et répondez aux questions.

- **Galileo : Fonctionnement du GPS européen.**



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

- a. Comment le système GPS détermine-t-il la position d'un récepteur, comme le téléphone de Lucas ?

Le système GPS détermine la position d'un récepteur en utilisant la triangulation basée sur les signaux de plusieurs satellites. Le récepteur mesure les temps de trajet des signaux des satellites et calcule sa position en fonction de ces temps et des vitesses de transmission des signaux.

- b. Combien de satellites au minimum sont nécessaires pour déterminer la position exacte d'un récepteur GPS ? Pourquoi ?

Au minimum trois satellites sont nécessaires pour déterminer la position exacte d'un récepteur GPS. Cela permet de réaliser la triangulation, où le récepteur calcule sa position en fonction des distances aux trois satellites et de leurs positions dans l'espace.

- c. Pourquoi est-il important que le téléphone de Lucas reçoive les signaux de quatre satellites en même temps ?

Le quatrième satellite est nécessaire pour synchroniser les horloges du récepteur avec les horloges des satellites. Cela compense les décalages temporels entre les horloges, ce qui améliore la précision de la mesure de la distance et, par conséquent, la précision de la localisation.

- d. Quelles sont les sources d'erreurs qui peuvent affecter la précision d'un récepteur GPS ?

Les sources d'erreurs comprennent la réfraction dans l'ionosphère et la troposphère, les différences de précision des orbites des satellites GPS, ainsi que les erreurs de synchronisation des horloges. Une petite erreur dans la mesure du temps peut entraîner une grande erreur dans la localisation.

- **Kezako : Comment fonctionne un GPS ?**



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

- a. Quelles sont les principales différences entre la triangulation utilisée pour se localiser dans la vidéo et la méthode utilisée par le GPS ?

La triangulation utilisée dans la vidéo pour la chasse au trésor est basée sur des cercles en deux dimensions. On obtient une position commune où les cercles se croisent. En revanche, le GPS utilise la trilatération en trois dimensions, avec des sphères au lieu de cercles. Les sphères d'incertitude déterminent une zone probable de la position en fonction de l'incertitude de mesure, et l'intersection de ces sphères donne la position probable.

- b. Comment les satellites GPS maintiennent-ils une synchronisation précise du temps entre eux et avec les récepteurs GPS, malgré la relativité temporelle ?

Les satellites GPS sont équipés d'horloges atomiques ultra précises pour maintenir une synchronisation précise du temps. Cependant, en raison des effets de la relativité, les horloges à bord des satellites se décalent par rapport à celles sur Terre. Pour corriger cela, les satellites ajustent constamment leur signal en fonction de leur position et de leur mouvement. De plus, les récepteurs GPS sur Terre tiennent compte de ces ajustements et comparent le temps reçu du satellite avec leur propre horloge. Cela permet de compenser les effets de la relativité temporelle et de maintenir une précision de synchronisation.

- **Enfin, en vous basant sur vos propres connaissances et le contenu de ces vidéos, résumez le fonctionnement de la localisation par GPS, sans oublier les défis à prendre en compte.**

Proposition de correction :

Le système GPS (Global Positioning System) se base sur une constellation de satellites en orbite autour de la Terre. Chaque satellite émet un signal contenant sa position et l'heure d'envoi. Les récepteurs GPS, comme ceux dans les voitures et smartphones, captent ces signaux.

Le principe est la trilatération en trois dimensions. Les récepteurs mesurent le temps que mettent les signaux des satellites pour arriver. En connaissant la vitesse des ondes radio (équivalente à celle de la lumière), le récepteur calcule sa distance à chaque satellite. Chaque satellite crée une sphère de position possible.

Pour une localisation précise, un récepteur doit capturer les signaux d'au moins trois satellites. En comparant les sphères d'incertitude de mesure, les récepteurs déterminent l'intersection des sphères, donnant une position probable.

Cependant, des défis existent pour assurer la précision du GPS. L'incertitude de mesure crée des marges d'erreur autour des sphères. Les horloges atomiques ultra précises des satellites synchronisent le temps, mais la relativité temporelle peut causer des décalages. Les satellites ajustent constamment leurs signaux pour compenser ces effets.

Les erreurs proviennent de la réfraction dans l'ionosphère et la troposphère, ainsi que des différences d'orbites des satellites. Malgré ces défis, grâce à des calculs complexes et aux horloges atomiques, le GPS offre une localisation précise dans des conditions idéales.

Comprendre le principe de la géolocalisation satellite

Fiche activité élève

1. Étape 1 – Repérer un point en 2 dimensions

- Avec une référence ...

Par deux, vous devez retrouver un trésor avec pour seul indice ... Le fait qu'il se situe à 250km de Nantes.



- Où peut-il bien être ? Est-ce suffisamment précis pour le retrouver facilement ?

.....

.....

.....

- **Avec deux références ...**

On vous donne un second indice : le trésor est également situé à 350 km de Dijon.

- Est-ce que cela facilite votre recherche ? Est-ce que cela vous permet pour autant de localiser le trésor avec précision ?

.....

.....

.....

- **Et avec trois références ?**

Un dernier indice ! On sait également que le trésor se situe à 350km de Paris.

- Est-ce que ce dernier indice suffit à localiser le trésor ? Quels obstacles voyez-vous à sa localisation précise ? N'oubliez pas que nous évoluons dans un environnement en 3 dimensions ... Et pensez à l'échelle de grandeur !

.....

.....

.....

2. Étape 2 – Du temps à la distance ... Un peu de calculs !

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 3×10^8 km/s.

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

.....

.....

.....

- 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 ?

.....

.....

.....

- 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.

4. Étape 4 – Au sujet de la précision des mesures

- **Une précision ... Relative**

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 produit 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.

- **À votre tour ! 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 ?

.....

.....

.....

- **Pour aller plus loin sur la précision**

La précision demandée est telle que des phénomènes relativistes (habituellement négligés) sont à corriger ! Il y en a deux principaux :

- **Le premier est dû à la vitesse de déplacement très élevée (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 μ s par jour.
- **Le second provient de la différence dans le champ gravitationnel terrestre auquel les satellites sont soumis**, en raison 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 μ s par jour pour le satellite.

Ces deux effets cumulés produisent donc un décalage de 38 μ s quotidiennement (+45-7=38 μ 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 nécessaires pour compenser ce décalage, afin 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 est conforme 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 :

Il y a des facteurs dits "naturels" qui réduisent la précision du GPS. Parmi ces facteurs, on peut mentionner, par ordre décroissant d'importance : 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, nommée 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.

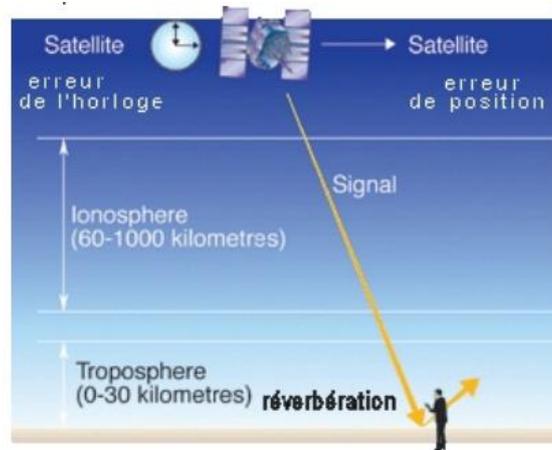
○ La réfraction dans la troposphère :

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 au 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 de 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 s'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) est influencée par cela. 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 mètres. Sur 20 000 km, cela donne une erreur de 10 cm sur une ligne de base de 10 km ! Ce type d'erreur est problématique pour les domaines qui demandent une grande exactitude, comme dans le domaine de l'observation des plaques tectoniques.

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



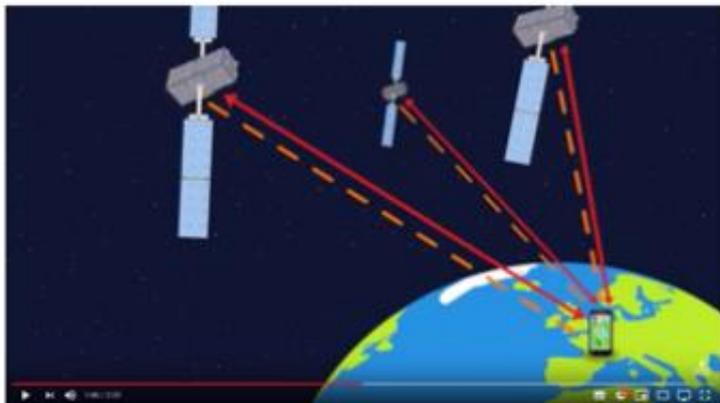
Pour conclure, il faut savoir que le système GPS est un système américain contrôlé par le département de la défense des États-Unis. L'utilisation de ce système par tous les pays autres que les États-Unis est souvent perçue comme une dépendance qui pose problème (pour des raisons géopolitiques). C'est pourquoi différents États développent leur propre système de positionnement par satellite :

- La Russie dispose de son système Glonass.
- L'Europe est en train de lancer les satellites du système Galileo.
- La Chine possède son système Beidou.
- L'Inde et le Japon ont également prévu leur système régional.

5. Étape 5 – Pour résumer

Visionnez les vidéos suivantes et répondez aux questions.

- **Galileo : Fonctionnement du GPS européen.**



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

- c. Comment le système GPS détermine-t-il la position d'un récepteur, comme le téléphone de Lucas ?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

- d. Combien de satellites au minimum sont nécessaires pour déterminer la position exacte d'un récepteur GPS ? Pourquoi ?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

e. Pourquoi est-il important que le téléphone de Lucas reçoive les signaux de quatre satellites en même temps ?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

f. Quelles sont les sources d'erreurs qui peuvent affecter la précision d'un récepteur GPS ?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

- **Kezako : Comment fonctionne un GPS ?**



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

- g. Quelles sont les principales différences entre la triangulation utilisée pour se localiser dans la vidéo et la méthode utilisée par le GPS ?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

- h. Comment les satellites GPS maintiennent-ils une synchronisation précise du temps entre eux et avec les récepteurs GPS, malgré la relativité temporelle ?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

