

GPS par satellite

mais comment ça marche?

Jan Spreen

Il y a quelques mois je me suis demandé pour la énième fois, comment un téléphone portable avec GPS arrive à calculer sa position sur le globe avec autant de précision. Car cela est tout de même absolument miraculeux, n'est-ce pas? J'ai souvent tendance, quand il se présente un phénomène remarquable, d'essayer de soulever un coin du voile couvrant le mystère, pour mieux sonder la chose étonnante. Généralement, mes recherches poussives ne laissent jamais de traces mais, cette fois-ci, j'ai dès le début tenu un petit journal de mon pénible parcours de sondeur et je peux maintenant composer un tendre compte-rendu me permettant d'offrir au passant égaré un apéritif spirituel.

A vrai dire, j'ai vite compris que c'est peine perdue de simplement s'informer à droite et à gauche et de prêter une oreille au premier venu. Personne ne semble avoir n'était-ce le moindre début d'un soupçon d'une connaissance factuelle concernant le système GPS. Le profane en la matière saupoudre le firmament avec des satellites, comme la mamie décore ses beignets avec du sucre glace. L'un s' imagine voir une nuée de satellites quelques vingt kilomètres au-dessus de sa tête, l'autre les fait circuler comme attachés à une corde virtuelle d'une longueur de 800 km + le rayon de la Terre. Sur ce sujet, il ne semble y avoir aucun fil conducteur permettant de lier les idées des uns aux celles des autres.

Heureusement, quand on est sur le point de se perdre

dans les incertitudes, on peut s'agripper à la bouée qu'offre Wikipédia pour se sortir de son marasme inculte et j'y ai trouvé mon bonheur. A savoir que, pour asservir le système GPS, 24 satellites, en 6 orbites, donc 4 satellites par trajet circulaire, tournent autour de la Terre à une altitude de 20000 km, avec une vitesse de 14000 km/h. Les 20000 et 14000 étant des approximations pour me faciliter l'écriture et simplifier la narration. Ce serait dommage que l'apéro assomme le passant égaré avant la fin des festivités.

Le système met en pratique des calculs mathématiques connus sous le nom de trilatération, une méthode pour trouver la localisation d'une personne ou d'une chose, par des constructions géométriques comprenant cercles, boules, triangles et que sais-je. L'élément de base du GPS, me dit le wiki, est un message envoyé par le satellite aux récepteurs tels que mon téléphone. Message qui contient l'exacte position du satellite dans l'espace ainsi que l'heure précise au moment de l'envoi. Ces données permettent ensuite au récepteur de calculer, par la comparaison de l'heure d'envoi avec celle de réception, la distance qui sépare ledit récepteur du satellite. Bien sûr, car le petit portable dans ma poche sait très bien que le signal lui est parvenu avec la vitesse de la lumière, que j'arrondis ici à 300000 km/s afin de ne pas perdre l'intérêt d'un lecteur ébloui ayant miraculeusement eu vent de cette succulente comptine. *(Une petite précision destinée aux lecteurs critiques et enclin à me coincer par tous les moyens : pour calculer une position dans l'espace par trilatération, il faut normalement quatre points de référence. Mais partant du principe qu'auteur et lecteur se trouvent sur la terre ferme, trois points suffiront.)*

Merci le Wiki! Maintenant nous pouvons nous mettre à la tâche, n'est-ce pas?

Oui, certes, nous le pouvons. Mais je sens qu'un court retour sur les sentiers bien balisés d'un randonneur de dimanche peu enclin à l'aventure, en forme d'un petit exemple bien digeste, pourrait nous permettre, une fois pour toutes, de ne pas nous perdre de vue avant le dernier mot de ce qui va suivre. Je ne ferai la démonstration que pour un satellite. Une fois bien compris le manège, le lecteur se fera un grand plaisir de faire lui-même le calcul pour les deux autres engins volants.

Un récepteur GPS reçoit à 10:50 un signal envoyé à 10:45. Le signal a donc mis 5 minutes = 300 secondes pour parcourir la distance qui sépare émetteur et récepteur, laps de Temps symbolisée par la lettre **T**. Partant du principe que le signal s'est déplacé avec la Vitesse de la lumière **V**=300000 km/s, nous pouvons écrire les lignes suivantes:

$$\mathbf{D=T \times V \text{ (Distance parcourue=Temps x Vitesse)}}$$

et donc

$$\mathbf{D=300 \times 300000=90000000 \text{ km.}}$$

Mince alors! 90 millions de kilomètres, cela en fait beaucoup! Il vaut mieux étudier un cas plus réaliste, un où **D**, la distance au satellite, est de 20000 km par exemple, car telle est l'altitude où tournent les satellites du GPS. Alors, il nous faut aussi adapter le laps de temps **T**. Non, attendez... Afin de simplifier nos calculs,

je propose de prendre la valeur de 30000 km pour **D**, ce qui peut se justifier par le fait que le satellite n'est généralement pas exactement à l'aplomb du récepteur. Ce qui nous donne :

$$D=T \times V$$

et donc

$$T=D/V$$

$$T=30000 \text{ km} / 300000 \text{ km/s} = 0,1 \text{ sec.}$$

Ainsi le signal met une dixième de seconde pour venir à mon téléphone depuis le satellite.

Mais ce n'est pas la fin de l'histoire, loin de là! Car, finalement, ce que nous voulons savoir, c'est comment mon mobile s'y prend pour me faire savoir que je suis **ici** et non pas **la-bas**, un kilomètre plus loin. Ou bien, comment peut-il savoir que je me suis déplacé du **pilier** au **poteau**.

Mon illustration cristalline va maintenant passer à une comparaison entre deux calculs de position. Comparaison qui montrera clair comme l'eau de roche, qu'il ne pourrait y avoir de doutes concernant le lieu où se trouve l'heureux possesseur d'un TomTom ou Garmin, lorsque ce veinard se fait murmurer à l'oreille, par une voix peut-être froide et autoritaire, mais toujours oh! combien sympathique et salvatrice, qu'il, le veinard donc, ferait bien de prendre à droite au prochain rond point.

Soit :

ici est éloigné du satellite de 30000 km : $D_1=30000$ km

La-bas est à 30001 km du satellite : $D_2=30001$ km

Avec en tête que :

$$D=T \times 300000$$

et donc

$$T=D/300000$$

nous pouvons écrire que :

$$T_1=D_1/300000 = 0,1 \text{ s}$$

$$T_2=D_2/300000 = 0,10000333333333 \text{ s}$$

$$T_2-T_1 = 0,000003333333 \text{ s}$$

Donc : Grâce à cette différence entre T_2 et T_1 de disons 3 milliardièmes de secondes, mon Galaxy S3 est en mesure de calculer sans failles que je suis **ici** et non pas **là-bas**. Ou que je suis parti du **pilier** pour aller au **poteau**, autre possibilité mentionnée ci-dessus et donc à ne pas négliger.

Permettez-moi de dépeindre la situation avec légèreté et de la servir avec verve, avant que les brebis égarées, dont moi-même, aient définitivement perdu le fil.

Le satellite envoie un message qui dit, d'une manière légère et avec verve : **MAINTENANT je suis ICI** . Ce

message a, au moment où il a été reçu par mon récepteur, une durée de vie comparable à celle d'une glace à l'eau sur le soleil car MAINTENANT, ça ne l'est plus dans une millième de seconde et ICI devient très vite AILLEURS, étant donné que le satellite n'a pas été conçu pour traîner sur place avec ses 14000 km/h.

D'une certaine manière nous pouvons comparer le signal du satellite avec une balle de tennis qui, servie avec une vitesse folle, doit être interceptée par ma raquette GPS en guise d'une petite boîte électronique.

Sshhhhouuuuuwwww..... la balle arrive.... une milliardième de seconde pour l'intercepter. Puis la balle doit être ouverte comme une noix car ce qui compte, c'est le déchiffrement du petit mot MAINTENANT je suis ICI à l'intérieur. Ensuite, le GPS récepteur doit comparer l'heure donnée par son horloge avec celle contenue dans le message du satellite. Tout cela ET avec une rapidité inouï, car la moindre fraction de seconde perdue et le calcul va être erroné de plusieurs kilomètres, ET pour au moins trois satellites à la fois. Car les calculs de trilatération ne sont justes et fiables seulement dans ces conditions-là. *(Et encore faut-il être sur la terre en non pas n'importe où dans l'espace.)* Ai-je appris dans le Wiki.

Que mon téléphone est capable de tout ça ! C'est un miracle, j'en ai le souffle coupé. Stupéfait je fixe la proue électronique, profondément ému, sans voix. Le petit appareil doit affronter une tâche herculéenne de dimensions titanesques, dès lors que j'active le GPS afin de savoir où je me suis encore fourré. Comment est-ce possible de faire autant de calculs diaboliquement complexes en si peu de temps ? Mais il y arrive, ne me

demandez pas comment. Dans la voiture, à vélo, en bateau ou pendant une ballade à pied, peu importe. Sauf par exemple au lit, car à l'intérieur il est impuissant, les satellites semblent être invisibles quand je suis dans ma maison avec mon téléphone. Heureusement c'est un endroit où je ne me perds pas beaucoup, on peut y être tranquille sans assistance GPS.

Mon émotion se calme peu à peu, on reconnaît bien le phénomène d'un enthousiasme se dégonflant doucement mais sûrement. On a tendance à devenir blasé en ces temps de publicité, d'un criard par minute vantant les mérites d'un produit douteux.

Heureusement mon élan enfantin est sauvée in extremis d'une défaite peu glorieuse, car tout d'un coup il me vient l'idée que je ne peux pas en rester là. Je dois approfondir mes recherches du GPS, sonder le système de mon mieux, n'était-ce pour pour ne pas laisser le lecteur, oh ! combien sympathique et curieux, seul avec ses doutes et ses lacunes.

Mon téléphone peut faire des calculs grâce à son microprocesseur. Avec un rythme constant, une véritable horloge, il se fraie un chemin à travers des milliards d'opérations. Voyons voir quelle est la vitesse CPU de mon S3, un petit moment SVP.... 1400 Mhz. Ce qui fait donc 1,4 milliard d'opérations par seconde.

Enfin, ça me fait une belle jambe. Une opération, c'est le remplacement d'une poignée de zéros par des uns, de quelques uns par des zéros. Combien d'opérations faut-il pour réceptionner le message d'un satellite ? De regarder l'heure qu'il est, à une fraction de millionième de seconde près ? Je n'en ai pas la moindre idée. Je propose donc de faire un petit état des lieux et de faire

l'inventaire de ce qu'il me reste à faire. J'écris « me », car je viens de me glisser dans la peau de mon Galaxy S3. Cela va enlever les dernières barrières technico-linguistiques faisant obstruction à une communication souple, cordiale et loyale entre auteur inspiré et lecteur incroyablement.

D'abord les tâches les plus urgentes car il n'y a pas de temps à perdre. Pour que je puisse connaître l'heure et de ce fait ma position, les montres montrent et les satellites s'attellent. En un clin d'œil **MAINTENANT** je suis **ICI** sera devenu **APRES** je serai **LA-BAS**

1. Réceptionner, déchiffrer et stockés les informations reçues des satellites un, deux et trois.
2. Regarder sur mon super-horloge l'heure qu'il est. Attention : **super**-horloge. Je ne peux pas faire avec moins que ça pour savoir l'heure qu'il est avec une précision de 0,000003 secondes. Et là, je suis encore clément. Car tout compte fait, 0,000003 secondes, c'est déjà le laps de temps qui peut fausser ma distance au satellite d'un kilomètre !

A mon avis, ces deux tâches doivent être effectuées en moins de 0,000001 secondes, sinon il me paraît vain de vouloir prétendre faire des calculs de précision. D'autant que mon système GPS se vante d'avoir une précision, non pas d'un kilomètre, mais de dix mètres ! On aura certainement l'occasion d'y revenir, à cette précision, si l'éventuel lecteur réussit à garder ses yeux ouverts, bien

entendu.

Les taches suivantes sont moins urgentes. Les données ont été stockées proprement et (ça ne sert à rien mais c'est possible) je pourrais encore calculer la semaine prochaine l'endroit où je suis en ce moment. Mais puisque je me respecte en tant que miracle électronique, je ne peux pas lâchement tout abandonner en si bon chemin et il me faut savoir **OÙ je suis MAINTENANT** .

Un GPS digne de ce nom indique environ une fois par seconde sa position à son maître et donc, je n'ai qu'une seconde pour mener à terme les opération suivantes.

3. Comparer l'heure de mon horloge interne avec celle contenue dans le message de chacun des trois satellites.
4. Calculer la distance qui me sépare de chaque satellite. (Pour éviter la prise de tête ingérable, présumons que la localité de chaque satellite va de soi.)
5. Construire trois boules virtuelles avec comme rayon la distance obtenue par la tache précédente. Chaque satellite est au centre d'une des boules, mon Galaxy se trouve sur le bord de chaque boule.
6. Calculer le point où les trois boules s'entre-coupent. C'est précisément à ce point que se trouve mon récepteur GPS.
7. Calculer les coordonnées de ce point.
8. Indiquer clairement, dans Google Maps, Waze, SailSafe ou une autre application de ce genre, où se trouvent randonneur, capitaine, gaffeur, coureur de jupons et autres personnages clés,

condamnés à errer jusqu'au bout de la nuit sans mon aide précieuse.

Mon téléphone sonne. Peu à peu je sors de mon état de transe dans lequel je fixe mon Galaxy avec un regard d'extase. Et je me dis subitement : Tout ça, ce n'est rien pour l'appareil, il continue laconiquement à faire tout ce qu'il faisait déjà. Pendant qu'il intercepte des signaux comparables à des balles de tennis supersoniques pour assurer que le patron reste sur le droit chemin, le patron peut téléphoner, regarder des clips sur youtube et envoyer des petit mots doux avec whatsapp. Pour ne citer que quelques applications parmi tant d'au...

Attendez, j'oublie quelque chose ! Je pensais pouvoir y revenir en souplesse un peu plus tard, mais ce n'est pas possible. Il faut l'aborder maintenant, c'est fondamental !

Le GPS, ce n'est pas une localisation à un kilomètre près mais, me dit-on, à dix mètres près ! **ET** : Cette distance ne représente pas un éloignement ou rapprochement de dix mètres du satellite, mais un déplacement sur le globe terrestre, c'est à dire selon un trajet formant pratiquement un angle droit avec le segment imaginaire reliant satellite et récepteur.

Alles umsonst, comme dirait l'allemand. Je dois refaire mes calculs si je veux offrir à mes lecteurs éveillés un travail éclairé. Le côté obscur et endormi, on connaît, je veux plus, différemment.

Soit :

- je suis ICI et je nomme ma distance au satellite

D₁.

- je prends pour **D₁** les 30000 km déjà mentionnés ci-dessus.
- je me déplace sur 10 mètres et j'appelle LA-BAS ma distance au satellite **D₂**.

Ai-je une idée combien pourrait être la différence entre **D₁** et **D₂** ? Non, pas la moindre.

Un petit calcul s'impose.

Admettons que le triangle SATELLITE – ICI – LA-BAS est un triangle rectangle en ICI et que le Trajet d'ICI à LA-BAS s'appelle **T**

T est un segment d'une longueur de 10 m=0,01 km (évitons de mélanger les unités!)

Alors, d'après Pythagore nous pouvons écrire :

$$D_2^2 = D_1^2 + T^2$$

$$D_2^2 = 30000^2 + 0,01^2$$

$$D_2^2 = 900000000 + 0,0001 = 900000000,0001$$

$$D_2 = 30000,0000000016666666666666662037$$

La différence entre **D₁** et **D₂**, sur laquelle s'appuie mon miraculeux boîtier GPS dans ses calculs de trilatération pour me remettre sur le droit chemin, s'élève donc, légèrement arrondie à

$$D_2 - D_1 = 0,000000002 \text{ km} = \dots$$

Ma respiration s'arrête une deuxième fois. Mais cette fois-ci ce n'est pas à cause d'une admiration sans bornes. Il y a plutôt de l'indignation dans l'air, me semble-t-il...

Car 0,000000002 kilomètres, cela fait 0,000002 mètres, qui font... 0,002 millimètres !!!!!

Ce qui implique que mon GPS serait comparable à un ruban à mesurer d'une longueur de 30000 km et avec une précision d'un millième de millimètre ! Ou avec une balance permettant de peser un camion de 30 tonnes à un milligramme près !

Des équipements d'une précision de 10^{-11}

Ce qui dans un monde de bricolage humain est totalement **IMPOSSIBLE** !

Et comment mon Galaxy peut-il savoir que je me suis déplacé parfaitement à l'horizontale ? Il suffirait d'une légère pente, le moindre déplacement vertical me rapprocherait aisément de quelques centimètres du satellite, 10000 fois les 0,002 mm ci-dessus. Quelques petits cailloux sous mes pompes et hop ! 200 mètres plus loin.

Ce n'est pas de l'indignation que je ressens, c'est de la colère, je suis outragé ! Quelque chose cloche terriblement, je me fais avoir !

Des centaines de pensées rebelles m'envahissent en un désordre total. Ma voiture peut tomber en panne et pour éviter cette galère je vais régulièrement chez le

garagiste. Comment sont entretenus ces appareils hyper sophistiqués au-dessus de nos têtes, dans l'espace ? De temps à autre un satellite se fait certainement tirer par une météorite, comme une boule à la pétanque, mais je n'en ai jamais entendu parler à la télé. Et comment peut-on mesurer à quelques microns (!) près à quelle distance se trouve un objet se mouvant à 14000 km/h à une altitude de 20000 km? Les satellites sont équipés avec des horloges atomiques. Me dit-on. Coûtent \$ 100000 pièce. Me dit-on. Où se trouve l'horloge atomique dans mon portable? Car celui-ci doit aussi pouvoir se débrouiller avec des fractions de milliardième de secondes s'il veut prétendre pouvoir manipuler ces 2 microns, distance parcouru par la lumière en combien de temps ? Enfin, le lecteur est assez grand pour trouver la réponse lui-même. Et celui qui n'en a pas l'énergie, soupçonnera certainement que la réponse est de l'ordre d'un zéro, d'une virgule, d'une interminable suite de zéros puis enfin, après de longues recherches, quelque part, un chiffre moins rond.

C'est bizarre. Je n'y ai jamais réfléchi et j'en ai encore moins douté. Mais maintenant ! Parce que, si on y pense un peu, le satellite... Il est catapulté par cette Space Shuttle chose à une altitude à laquelle il va tourner en rond comme le caillou de Thierry la Fronde jamais lâché et où, dans une orbite parfaite, il va rendre des services pendant des années sans jamais réclamer un tournevis ou une goutte d'huile. Mais comment cela est-il possible? Et où trouve-t-il l'énergie pour vaincre l'attraction terrestre et ne pas se noyer dans l'océan ou s'écraser sur la roche en moins d'une semaine, jour voire heure?

“Si dans l'univers un objet quelconque tournait autour d'une planète avec une vitesse angulaire assortie à la distance entre objet volant et planète, alors cet objet pourrait continuer à tourner jusqu'au jugement dernier.”

disait le professeur de physique il y a un demi siècle. Peut-être pas dans ces termes exacts, mais tel était le sens de la phrase. *“Dans l'espace il n'y a rien qui pourrait freiner l'objet”,* ajoutait-il, *“la situation est en équilibre et ne changera pas. A cause de la gravité l'objet et la planète s'attirent, de par sa vitesse l'objet veut s'éloigner de la planète comme étant repoussé. Attirance et rejet s'annulent.”*

Ma rébellion prend des proportions inquiétantes et je pense dans mon insoumission maintenant hors contrôle : « Des âneries ! Si la gravité n'est pas compensée par un petit moteur, alors un tel objet chutera comme une brique ! » Mais restons calme, l'énervement et des gros mots ne mènent à rien. Donc, OK, le maître a raison. Au quel cas j'aimerais bien savoir dans quelle mesure attirance et rejet s'annulent avec exactitude ! Si Thierry ne veut pas se prendre son propre caillou dans la gueule, il lui suffira de tourner la fronde assez rapidement, la solidité de la corde empêchera le caillou de prendre son envol avant l'heure. Mais notre satellite n'est pas attaché à une corde qui ne cède pas. Le moindre écart de la vitesse angulaire appropriée et le satellite s'écrase sur la planète, ou se perd au fin fond de l'univers. Donne à Thierry une fronde qui se casse quand il la fait tourner un peu plus vite que nécessaire pour ne pas se prendre la pierre lui-même. Ou une dont la corde est en élastique, encore mieux. M'étonnerait

qu'il soit encore capable de toucher une cible dans de telles conditions !

Global Positioning System... Ça sent le fagot à dix lieux ! Depuis le jour où le Père Noël s'est écrasé avec son traîneau, je n'ai plus jamais eu la sensation de m'être fait avoir à ce point ! D'où nous est venue l'idée d'un GPS par satellite, qui l'a proposé en premier ? Attendez, je vais poser la question à Google....

Je me force de ne pas éclater en un rire sardonique et je me limite à une manifestation d'amusement civilisée, bien que non dénuée d'ironie voire de sarcasme. « Ah ! Tout devient clair comme l'eau de roche ! Le premier à le proposer était un certain Arthur C. Clarke. En tant que scientifique ? Non, comme écrivain d'histoires de science fiction ! Science Fiction !! »

Peut-être changerai-je encore d'opinion un jour, mais pour le moment il me semble qu'il faille interpréter le GPS de la manière suivante :

Ce n'est pas Arthur C. Clarke qui a devancé la science dans un moment de génie avec des visions d'un futur meilleur, il faut le voir autrement. Les élucubrations de Clarke ont donné à quelques hommes d'affaires des visions d'une montagne d'argent, bien plus à la portée de l'humain qu'un monde



meilleur. Le public gobe tout, se sont-ils dit. Quelques histoires fantasques déguisées en articles scientifiques et illustrées avec des impressions artistiques d'un satellite dans son orbite autour de la Terre. Hourra ! Le contribuable régale !

Le « Space Shuttle », tout ce qu'il doit mettre en orbite (des canettes vides je présume), il le lâche quelque part au-dessus de l'océan, ni vu ni connu. Et encore, s'il transporte quelque chose...

Les signaux nécessaires à la trilatération - car il est bien entendu indéniable que mon GPS me donne ma position à quelques mètres près -, ça doit être une affaire entre les antennes téléphoniques terrestres et mon téléphone. Puis pour ce qui est des équipements professionnels, capables de guider par exemple le trafic maritime en haute mer, on peut évoquer les systèmes, déjà anciens mais certainement perfectionnés de nos jours, dont personne ne parle, tel que Loran, Decca et Omega. Mais ces systèmes n'ont pas vocation à remplir les poches des plus avides, ils sont trop incompréhensibles et ennuyeux, l'homme de la rue n'y dépenserait pas un centime du fruit de son dur labeur. Mais la belle image du satellite (qui donc a pris la jolie photo ?) par contre, ça, c'est autre chose, c'est captivant, ça parle à l'imagination de nous tous ! Parce que, ces engins-là, mon petit, ça coûte des milliards, tout le monde comprend.

Enfin. Tout le monde sauf un. Moi, je n'y crois plus. Ils peuvent se les garder, leurs histoires à dormir debout.

*Les enfants croient au Père Noël
Les adultes croient aux satellites GPS*

Les enfant sont excusables, ils sont jeunes et reçoivent des jolis cadeaux. Mais les adultes devraient être moins crédules et apprendre à réfléchir. Avaler des couleuvres te coûte ton âme et beaucoup d'argent.

Cornillon-Confoux
31 Janvier 2016