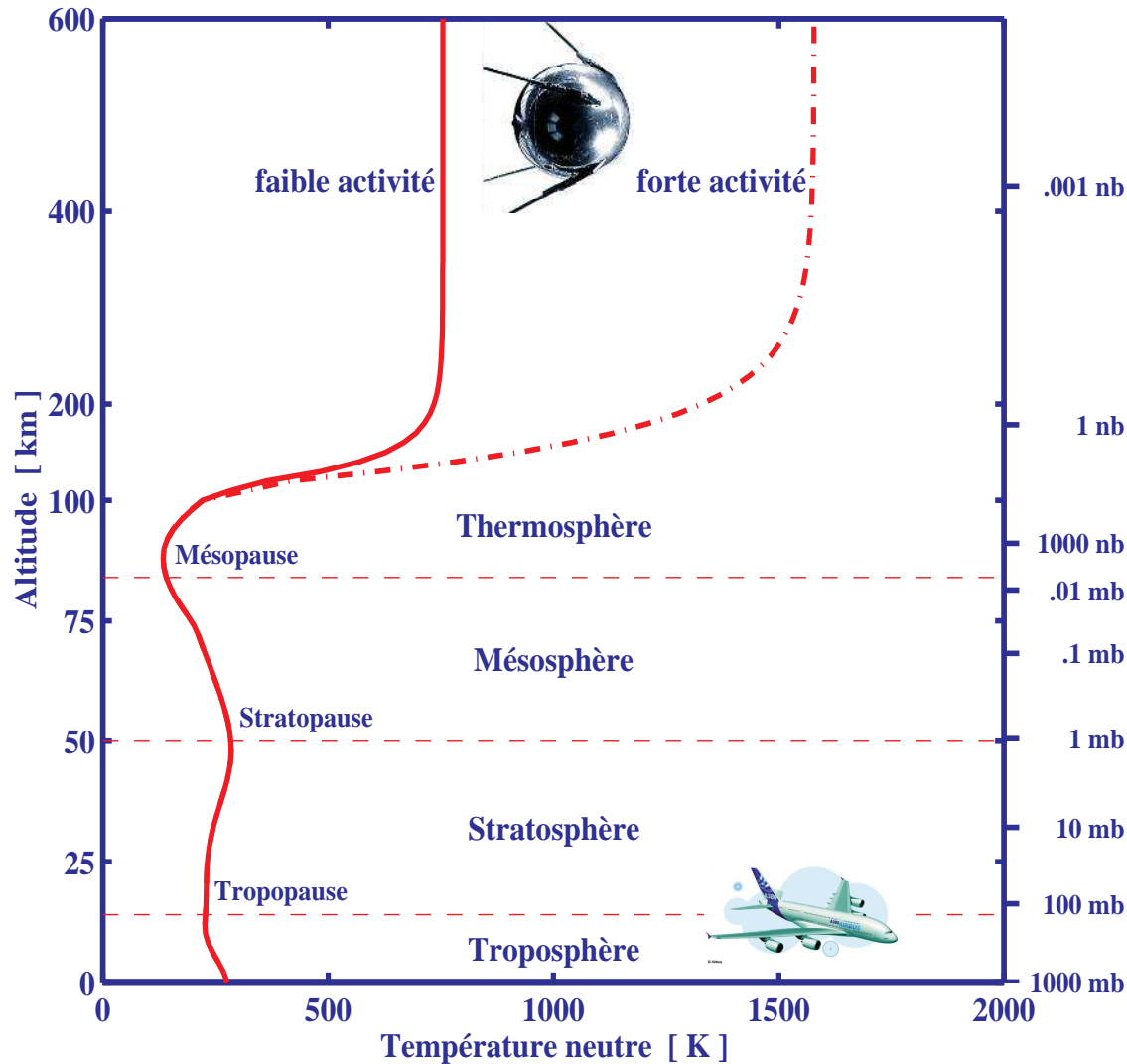


La DRM Digitale Radio Mondiale et l'étude de l'ionosphère

- L'ionosphère hélas, ce n'est pas encore simple (mais défricher ce qui est compliqué n'est-ce pas amusant ???).....
- La boîte à outils logiciels. L'amusement commence...
 1. Le logiciel "Spectrumlab" –analyseur de spectre- qui permet de retrouver les signaux des extra-terrestres, analyser le chant des oiseaux, de démasquer les divas qui chantent faux et d'analyser les signaux radio qui ont été déformés après leur passage dans l'ionosphère.
 2. Le logiciel "Dream" qui permet de retrouver la station de radio RTL codée dans un souffle et de plus extraire un tas d'informations sur la déformation des signaux après leur passage dans l'ionosphère.

Atmosphère, Atmosphère ??: structure en couches



L'atmosphère terrestre est divisée en 5 couches de plus en plus ténues à mesure que l'on s'éloigne de la surface :

- **La troposphère** : elle contient l'air que nous respirons. C'est elle qui est responsable du temps qu'il fait. Elle s'élève de 8 à 15 km d'altitude. La température baisse au fur et à mesure que l'on s'élève.
- **La stratosphère** : elle s'étend jusqu'à 50 km d'altitude. La température y croît avec l'altitude en raison de l'absorption de la plus grande partie du rayonnement ultraviolet du soleil par la couche d'ozone. C'est par cette action que la couche d'ozone protège la vie sur Terre.
- **La mésosphère** : elle s'étend jusqu'à 90 km d'altitude. Elle se caractérise par une température décroissante au fur et à mesure que l'altitude augmente. C'est la limite supérieure que l'on trouve les températures les plus basses de l'atmosphère (173°K ou -100°C)
- **La thermosphère** : c'est là que gravitent les satellites artificiels et vaisseaux spatiaux.
- **L'exosphère** : c'est la limite supérieure de notre atmosphère.

Il existe une couche particulière de la thermosphère : la **ionosphère**. Cette couche est en permanence soumise au rayonnement ultraviolet, aux rayons X, aux particules solaires et au rayonnement cosmique. Il en résulte une ionisation. L'ionosphère est un mélange de gaz neutre et de plasma qui est conducteur de l'électricité. Les particules électriquement chargées sont soumises au champ magnétique de la Terre et circulent dans la magnétosphère.

Modèle de l'ionosphère en couches. Regarder le spectre

La principale vertu de l'atmosphère vis à vis des ondes lumineuses est sa transparence. Il y a bien quelques effets de mirages, de turbulences, de rayon vert mais c'est secondaire. Pour les ondes radio, c'est très compliqué. **La partie ionisée de l'atmosphère appelée ionosphère** nous rend service mais de façon capricieuse et compliquée.

Pour les grandes ondes et les petites ondes, elles sont arrêtées par la partie haute de l'atmosphère et même mieux elles sont réfractées comme la lumière est conduite dans un guide d'onde, il y a aussi analogie avec un miroir. Ces ondes peuvent faire le tour de la terre.

Pour les ondes courtes entre 4 MHz et 18 MHz , c'est la frontière un coup ça passe, un autre coup ça ne passe pas : ça dépend de façon non limitative :

- De la fréquence
- De la nuit ou du jour
- De la saison
- De la latitude
- De l'activité du soleil dans son cycle de 11 ans, des rayons cosmiques, du champ magnétique etc.
- Mais pas de l'âge du capitaine et d'une manière ou d'une autre c'est le **soleil** qui gouverne à 99% les propriétés de l'ionosphère.

Le pourquoi et le comment ont occupé, occupent et occuperont des générations de physiciens et les radioamateurs ont été des pionniers dès les années 1920 dans ce domaine.

Pourquoi un tel comportement ? : c'est parce qu'il existe des lumières très énergétiques au delà de l'UV qui fait bronzer et qui décomposent carrément les molécules de l'air et les transforment en électrons et en ions c'est l'**ionisation**. Et on arrive au quatrième état de la matière : le plasma qui est celui qui occupe le plus de volume dans l'univers.

L'ionosphère et la physique des plasmas servent dans :

- Les premiers Radars qui étaient des sondeurs ionosphériques et qui ont servi à mesurer la hauteur des couches ionosphériques. Leurs mesures en temps réel se trouvent maintenant sur Internet.
- Le fonctionnement des tubes fluorescents et des tubes à décharge du type 'lampes Flash', les redresseurs à vapeur de mercure.
- La gravure plasma utilisée en technologie des semi-conducteurs.
- Les interrupteurs à très haute puissance utilisant des arcs électriques : exemple des parafoudres et des gros disjoncteurs d'EDF.
- Les premiers émetteurs radio à arc "chantant".
- Les propulseurs de fusées ioniques ou à plasma.
- Les générateurs d'électricité magnéto-hydrodynamiques.
- L'énergie de la fusion nucléaire dans les tokamaks.
- Les armes électromagnétiques.
- La propagation radio pour les satellites en particulier pour améliorer la précision du positionnement du GPS.
- La physique fondamentale avec des applications en astrophysique pour comprendre les sources énergie en radioastronomie.
- Et bien sûr dans la propagation de la radio pour la CB, les radio-amateurs, la radiodiffusion etc.

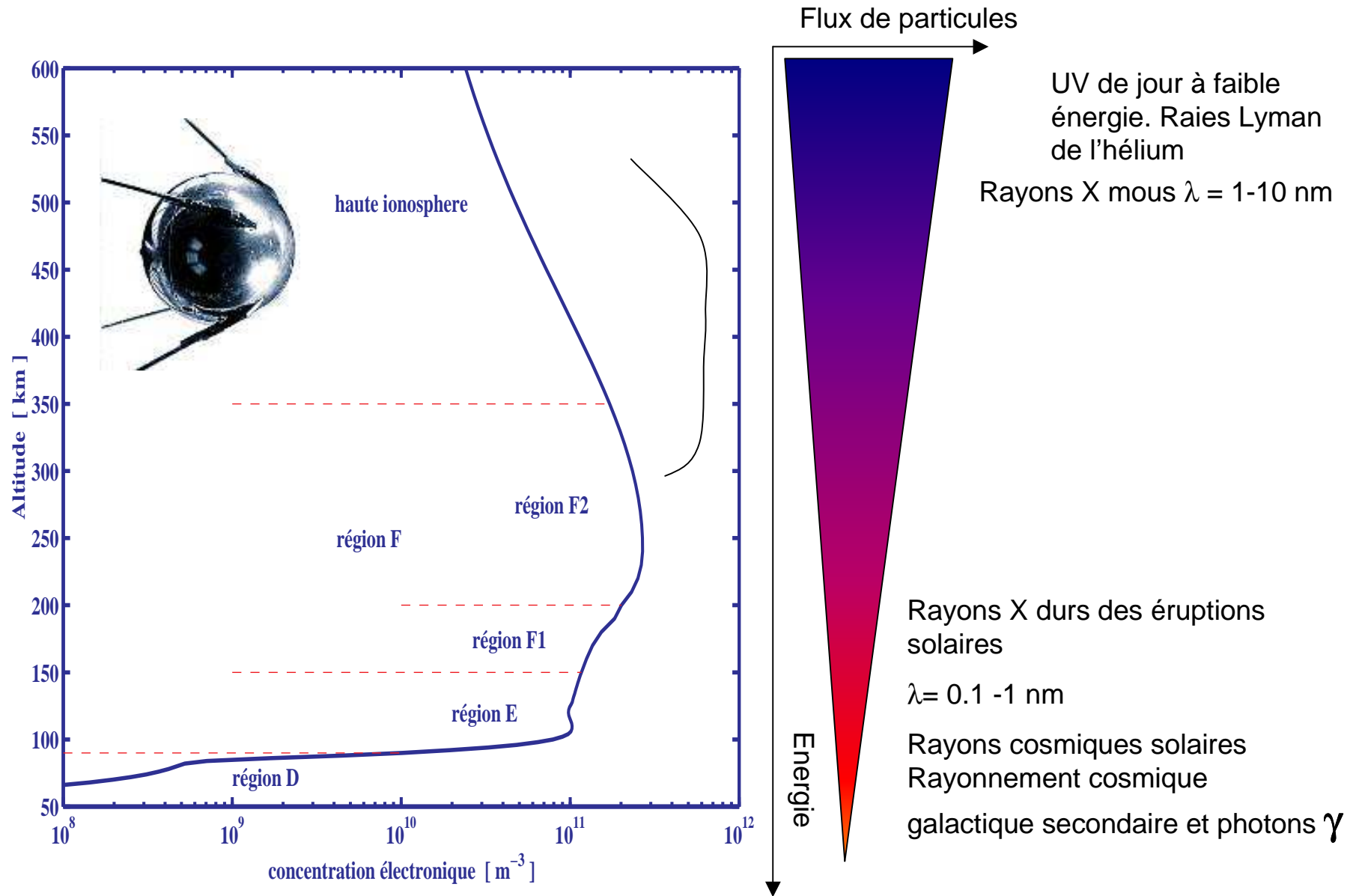
La physique des plasmas dans l'ionosphère

Et en plus, il y a des réactions chimiques qui créent des nouveaux gaz inconnus dans la basse atmosphère.

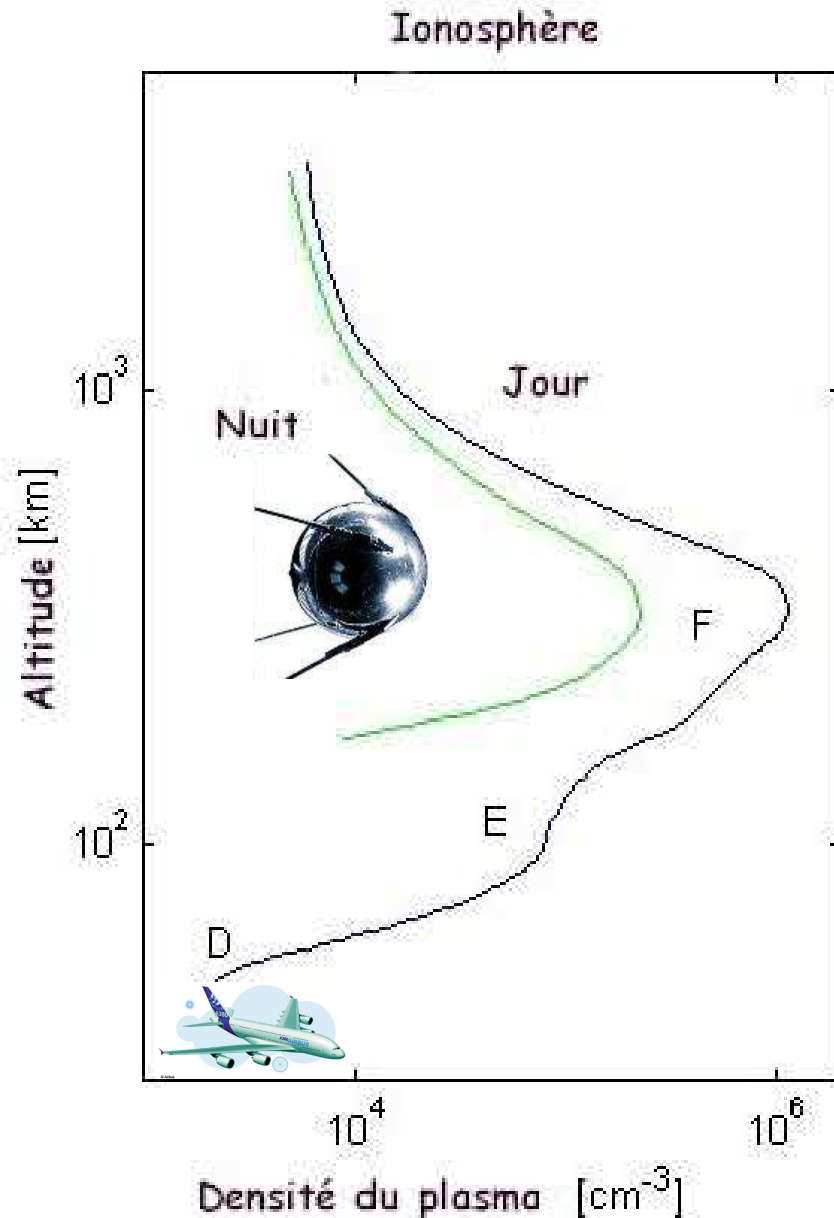
Une fois l'air ionisé, il se comporte différemment suivant :

- le type d'ion par exemple l'oxygène atomique O^+ qui donne un sillage derrière la navette spatiale,
- le champ magnétique local (Explication des couches O et X extraordinaire)
- le rapport entre le nombre d'ions et les neutres qui décide de la durée de vie de l'ionisation
- Tantôt cela absorbe comme la couche D pendant le jour
- Ou encore s'il y a assez d'ions, il y a ralentissement des ondes et c'est une variation d'indice comme dans une lentille et il y a courbure des rayons et une réfraction. S'il n'y en a pas assez, il y a transparence.
- Ou encore il y a une réflexion comme sur un miroir métallique.

Les rayonnements et les particules qui décomposent la haute atmosphère pendant le jour



Les couches ionosphériques entre le jour et la nuit



La couche D disparaît la nuit car l'ionisation de jour est trop faible.

La couche E est fortement réduite la nuit.

Il y a une diminution de 5 en concentration pour les couches F entre le jour et la nuit.

La concentration en ions y reste suffisante pour permettre la propagation de la radio mais la fréquence maximale utilisable est réduite

La couche ionosphérique D

- La région D (altitude entre 50km le jour à 90km la nuit) Day n'existe que le jour et se trouve en dessous de la couche E.
 - Elle est la plus proche de la surface de la Terre.
 - Cette couche est produite par les quelques particules très énergétiques et ionisantes comme les rayons cosmiques du soleil qui ont réussi à traverser les couches supérieures.
 - Le taux d'ionisation est faible et il se réduit très fortement la nuit à cause des recombinaisons. Les rayons cosmiques galactiques maintiennent une petite ionisation pendant la nuit.
 - Cette couche n'est pas assez ionisée pour réfléchir les ondes radio mais elle absorbe fortement les petites ondes vers 1MHz
 - La couche D absorbe fortement les petites ondes pendant le jour.
 - Pendant la nuit, la disparition de la couche D améliore la propagation de ces petites ondes.
 - Les ondes de fréquence > 10 MHz ne sont pas affectées par la couche D. Tant mieux pour les satellites.
 - C'est la couche qui contient l'ozone qui absorbe les rayonnement ultraviolets non ionisants mais dangereux pour la santé.

La couche ionosphérique E

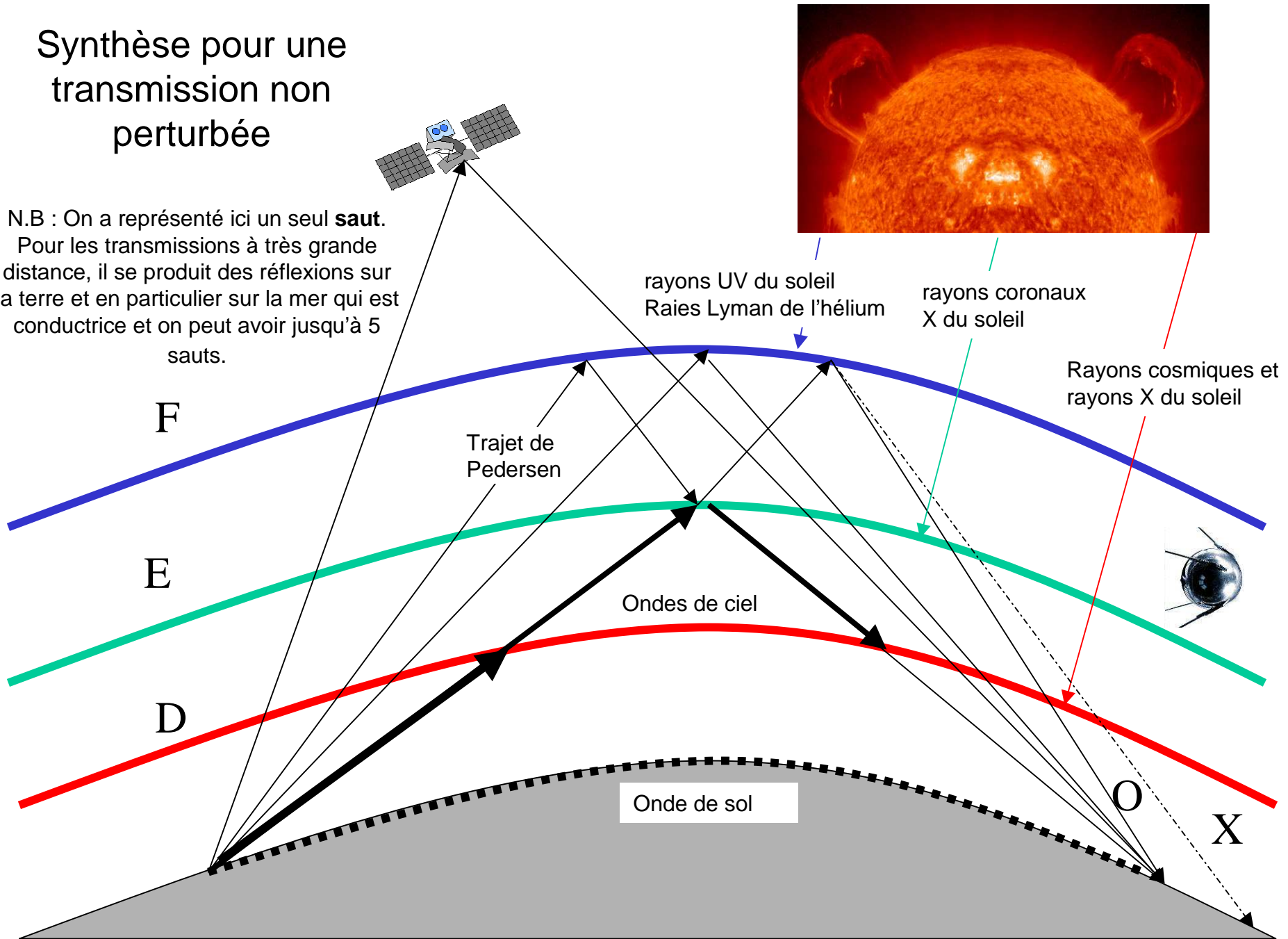
- La région E hauteur 110 km E comme Electric
- Elle a été la première mise en évidence pour expliquer à partir des années 1900 les propagations de la radio au delà de l'horizon.
- Elle permet des propagations à grande distance avec plusieurs réflexions successives.
- Elle existe le jour et disparaît en partie la nuit ce qui réduit la gamme de fréquence réfléchies mais les ondes longues et moyennes passent toujours tandis que les ondes courtes trop courtes (fréquences élevées) vont tout droit et se perdent..

La couche ionosphérique F

- Cette couche est située au dessus de la couche E d'où son rang F
- Pendant le jour, il y a deux couches F1 et F2
- Sous-couche F1 hauteur 200 km
- Sous-couche F2 hauteur 300 km
- Ces couches étant directement exposées au rayonnement du soleil sont les plus ionisées et ce sont celles qui permettent la réflexion des fréquences les plus élevées.
- Plus l'altitude augmente, moins il y a de molécules à ioniser et l'effet miroir disparaît et ionosphère devient transparente à toutes les fréquences
- Elle est bien ionisée pendant le jour et moins la nuit. Les couches F1 et F2 fusionnent en une couche F la nuit.
- En règle générale on considère que l'ionosphère est transparente au delà de 18 MHz et qu'elle est étanche en dessous de 1.3 MHz. Entre ces deux fréquences, ça dépend

Synthèse pour une transmission non perturbée

N.B : On a représenté ici un seul **saut**.
Pour les transmissions à très grande distance, il se produit des réflexions sur la terre et en particulier sur la mer qui est conductrice et on peut avoir jusqu'à 5 sauts.



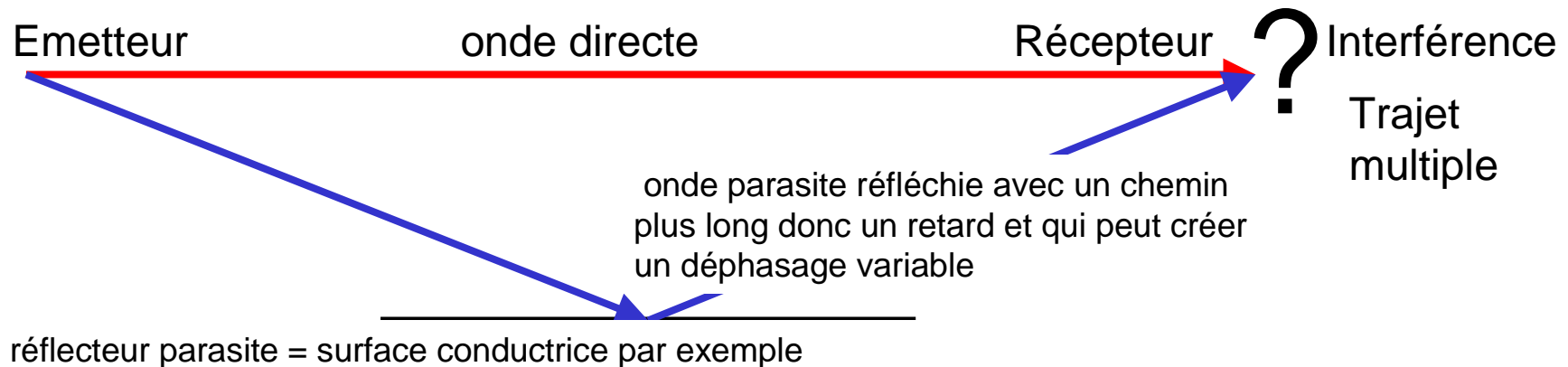
Les 2 causes de perturbations des ondes

1 : Le chemin des ondes 2 : l'onde elle même

- 1) C'est le milieu qui propage l'onde qui peut subir une modification.
- Par exemple la lumière du soleil est absorbée et diffusée par la vapeur d'eau contenue dans les nuages. Cette perturbation se mesure facilement.
- 2) Plus subtil : Une deuxième onde parasite qui poursuit la première en suivant le même chemin peut tantôt la détruire tantôt la renforcer ceci en fonction du retard ou de la phase de l'une par rapport à l'autre. On dit que l'on a un trajet multiple. Cette toute petite propriété de rien du tout qui s'appelle la **phase** et qui n'a pas d'importance pour une onde toute seule devient très importante quand deux ondes veulent exister au même moment. Ces batailles d'ondes s'appellent **interférences** ou **battements**. Pour trouver l'origine des ondes parasites, il faut étudier le chemin et chercher un défaut comme une réflexion qui recrée une deuxième onde parasite. C'est beaucoup plus difficile à détecter que la modification d'un chemin. Pour la lumière quand on fait des photos, on n'aime pas du tout les reflets parasites.
- Bien entendu et c'est ce qui complique les choses, **les deux causes de perturbations existent en même temps.**

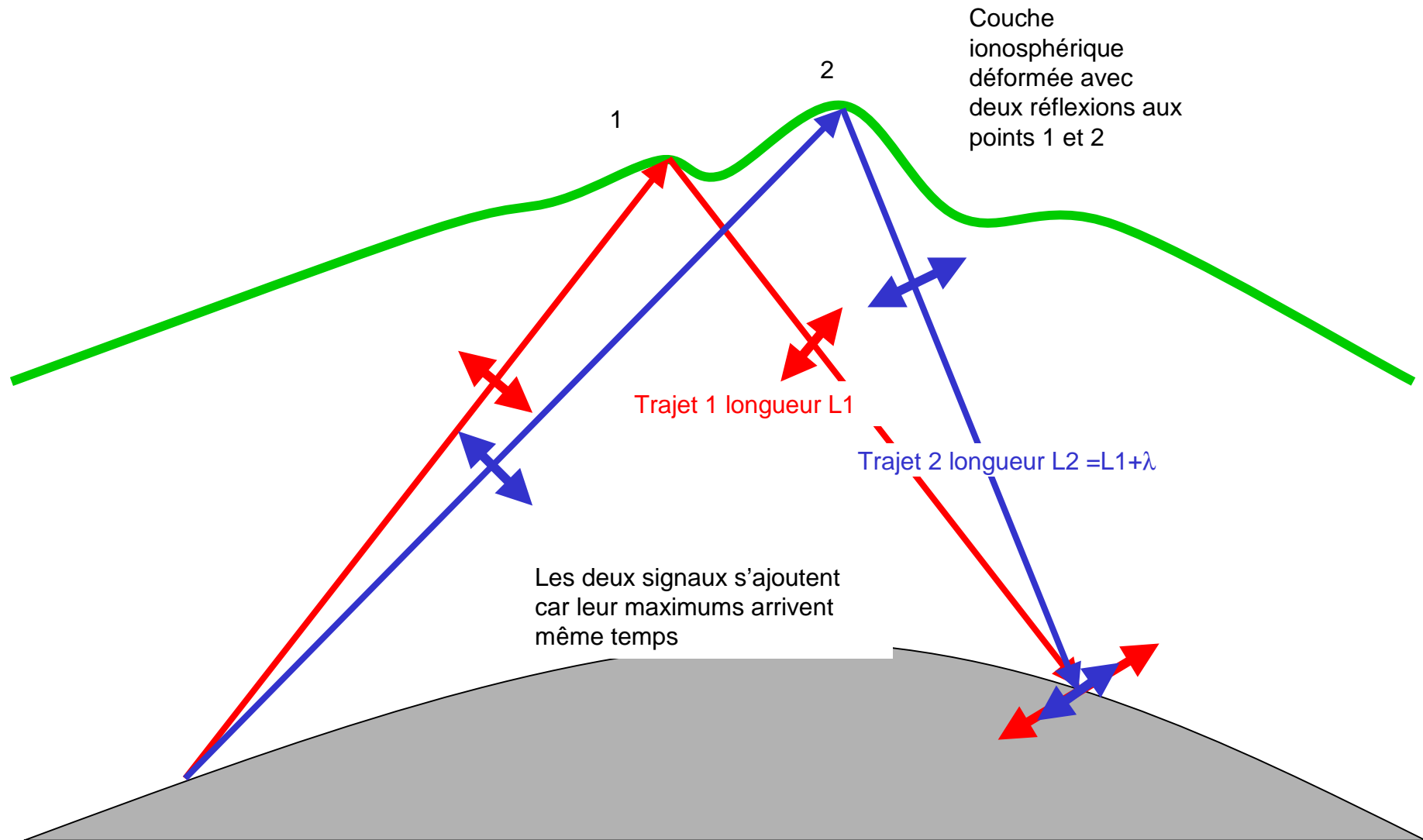
Les batailles d'ondes ou les interférences

- Une onde unique au départ est émise dans toutes les directions et elle peut se réfléchir (ou se réfracter) si un obstacle se trouve entre l'émission et la réception.
- Dans le prolongement, on aura une onde directe et une onde réfléchie qui pourront interférer et donc se détruire.
- On rencontre très fréquemment cette situation. C'est pourquoi une bonne antenne a toujours intérêt à être directive et le plus dégagée possible de tout obstacle réfléchissant voisin.



- Toit de voiture : réception de la radio FM en voiture
- Personnes se déplaçant dans une pièce : antenne de radio ou de TV intérieure
- Gaz ionisés de l'ionosphère
- Surface de la mer
- **Dans la série tout peut servir quand on sait s'en servir** : On utilise le principe des déphasages dans les voitures pour les Kits mains libres des téléphones portables : l'onde parasite du bruit du moteur est captée par des micros, analysée et renvoyée égale et en opposition de phase de façon à être annulée.

Cas où les deux signaux s'ajoutent : explication insuffisante sans la représentation des ondes avec leur phase



Interférence constructive : les deux ondes s'entendent entre elles et s'ajoutent

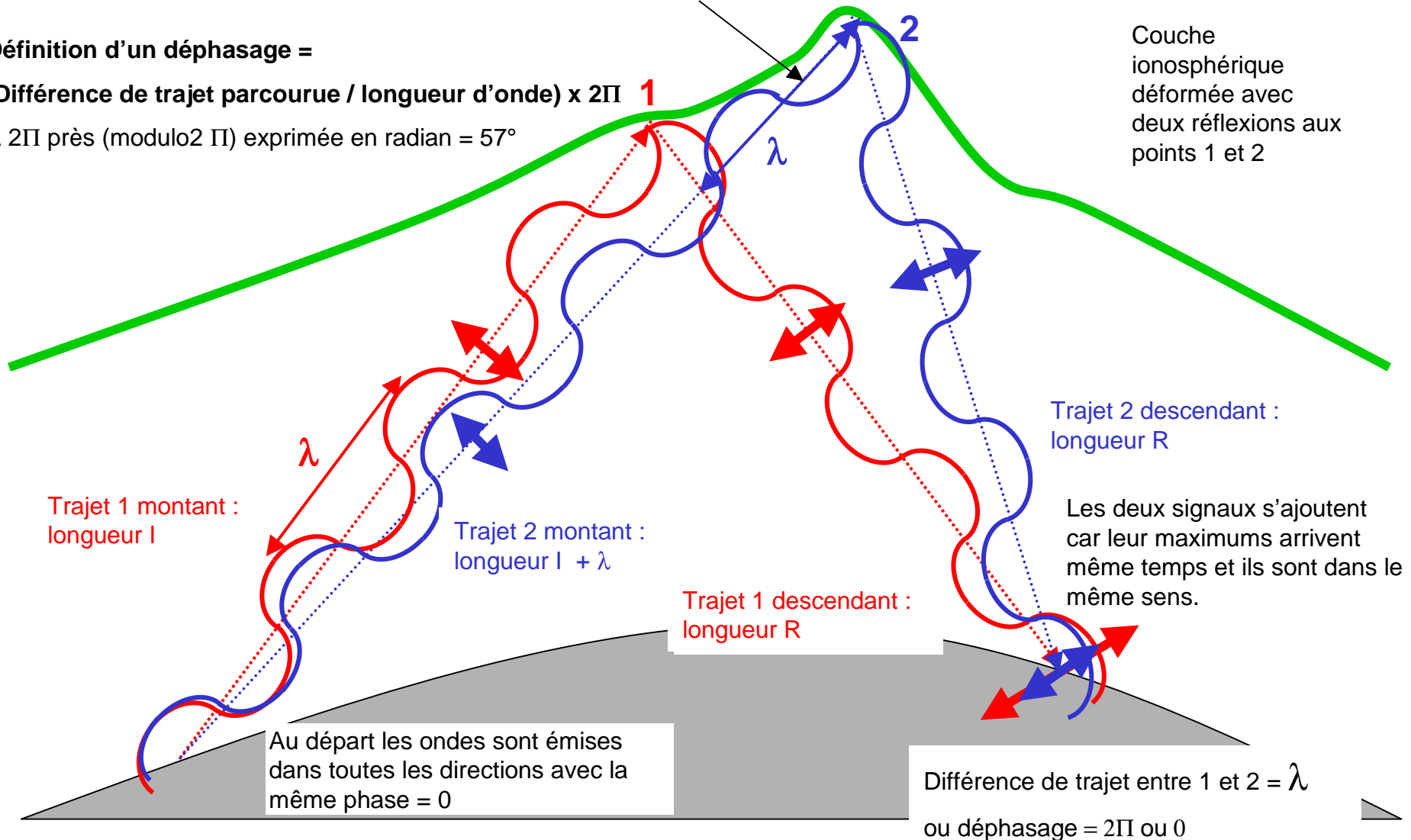
Trajet supplémentaire de longueur λ ou déphasage de 0 : les deux ondes 1 et 2 après réflexion sont superposables

Définition d'un déphasage =

(Différence de trajet parcourue / longueur d'onde) $\times 2\pi$

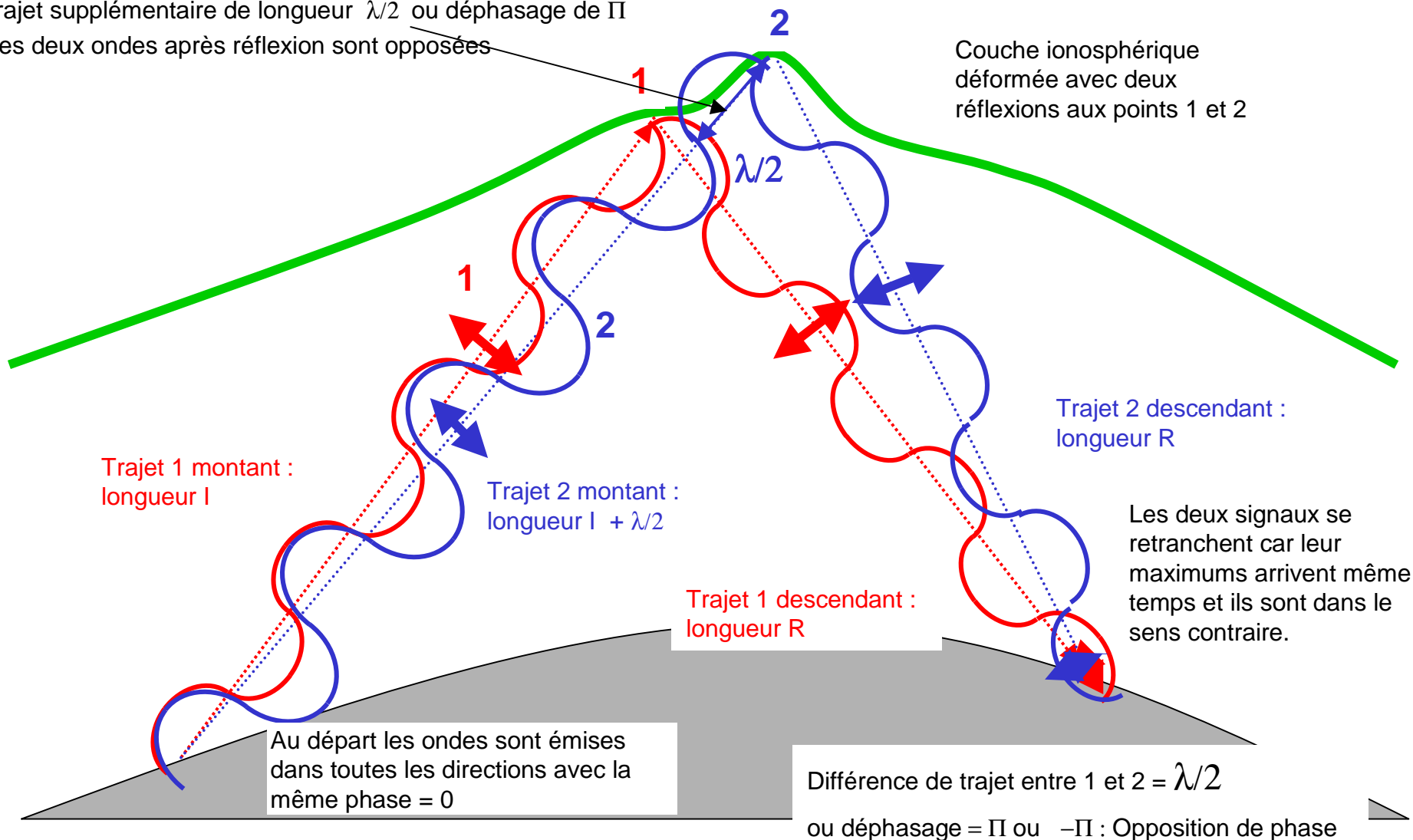
À 2π près (modulo 2π) exprimée en radian = 57°

Couche ionosphérique déformée avec deux réflexions aux points 1 et 2



Interférence destructive : les deux ondes ne s'entendent pas entre elles et elles se détruisent mutuellement ou comment tuer une onde avec une autre onde

Trajet supplémentaire de longueur $\lambda/2$ ou déphasage de Π
: les deux ondes après réflexion sont opposées



Phénomènes modifiant la propagation à un endroit donné et moyens d'observation 1/3

•Moment du jour.

- **Nuit** : Pas de trace en bande étroite ou large bande
- **Lever du soleil** : Transition rapide entre le bruit de fond et un signal maximum avec des battements / chemins multiples observables en bande étroite et des évanouissement sélectifs glissants observables en large bande
- **Milieu** du jour : Diminution du signal par augmentation d'absorption de la couche D diffusion back scatter plus de dédoublement de raie, élargissement de la raie en bande étroite
- **Coucher du soleil** : Augmentation du signal suite à la disparition de la couche D, variations de fréquence par ondes de gravité, battements /chemins multiples observables en bande étroite et des évanouissements sélectifs glissants observables en large bande

Phénomènes modifiant la propagation à un endroit donné et moyens d'observation 2/3

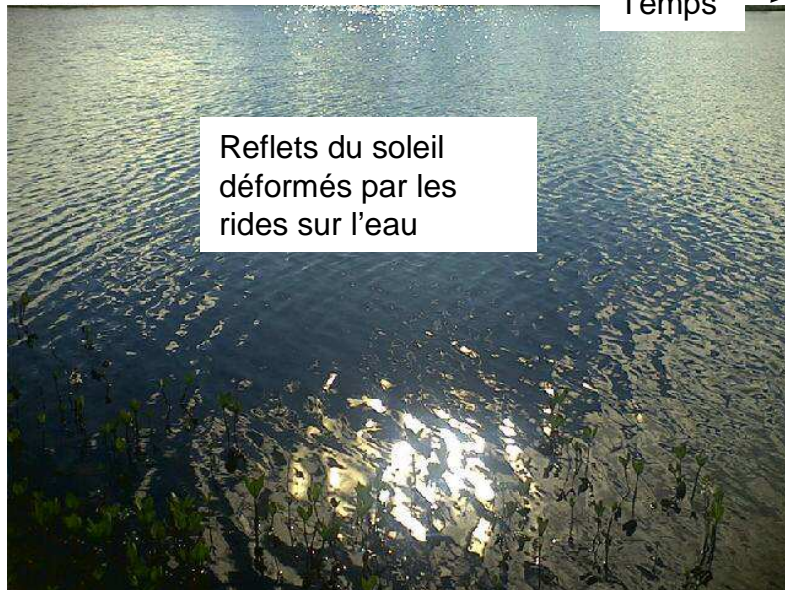
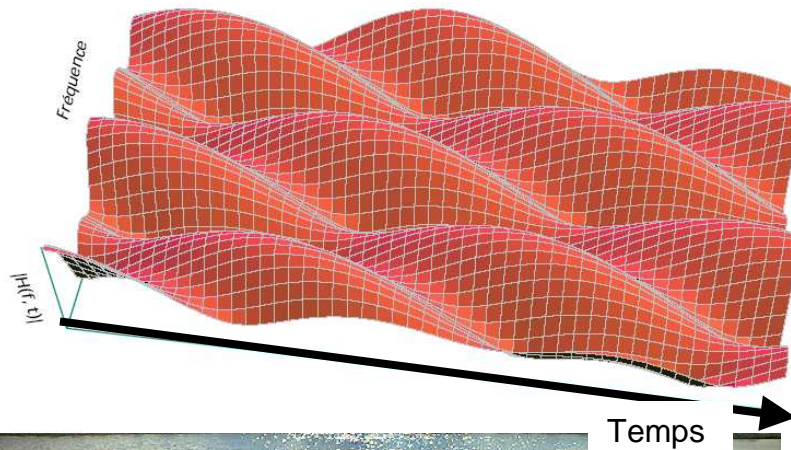
- **Activité du soleil** : Quantité de rayons X et UV ionisants qui créent les couches ionisantes réfléchissantes E et F et la couche absorbante D. Ceci est modulé à l'intérieur d'une année par la saison et par l'état calme ou agité du soleil dans son cycle de 11ans.
- Champ magnétique variable du soleil qui module la quantité de rayons cosmiques.
- Champ magnétique qui crée une onde extraordinaire X qui dédouble l'onde ordinaire O.
- Ondes de gravité dues à la transition jour nuit (passage du terminateur)
- Ébranlements de l'atmosphère dus à des tempêtes, des éruptions volcaniques, Séismes, des explosions nucléaires, des départs de fusée etc.
- Réflexions d'onde sur des avions.(principe du radar bi-statique).
- Réflexions d'onde sur les traînées météoritiques, les nuages gorgés d'eau.
- Déformations diverses de l'ionosphère due à l'effet de marée, les vents ionosphériques.

Phénomènes modifiant la propagation à un endroit donné et moyens d'observation 3/3

- Les variations de l'ionosphère de taille plus petite que la longueur d'onde provoquent des phénomènes de diffraction..
- Réflexions d'onde sur des avions.(Principe du radar bi-statique).
- Réflexions d'onde sur les traînées météoritiques, les nuages gorgés d'eau.
- Les variations de l'ionosphère de taille plus petite que la longueur d'onde provoquent des phénomènes de diffraction
- Les trajets ionosphériques passant sur la mer sont déformés par le réseau de diffraction constitué par les vagues déplacées par le vent : par analyses Doppler on peut connaître la hauteur des vagues et leur direction. Ce moyen de faire de la météorologie a été testé il y a quelques années par l'ex CNET dans le cadre des études de défense nationale pour les radars trans-horizon.

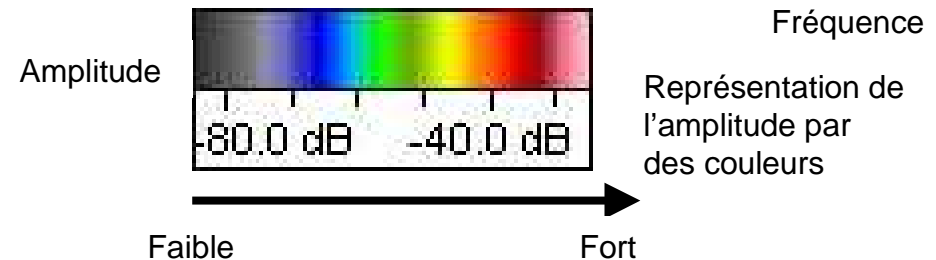
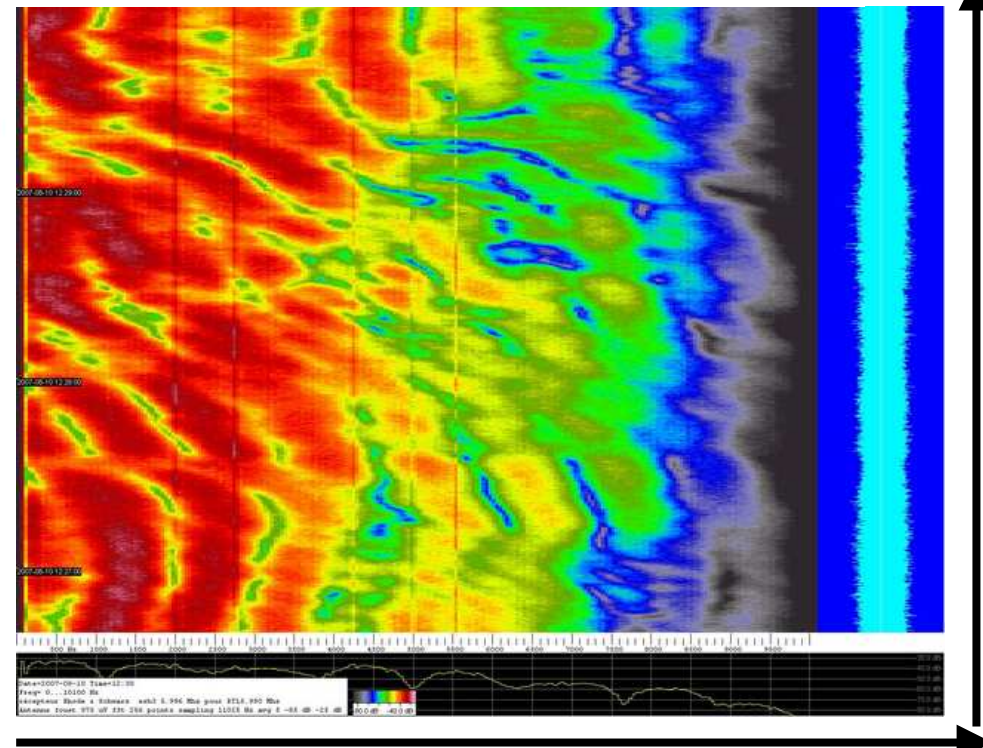
Des analogies entre les reflets du soleil sur l'eau et la réception de la radio

Spectrogramme 3D avec des surfaces

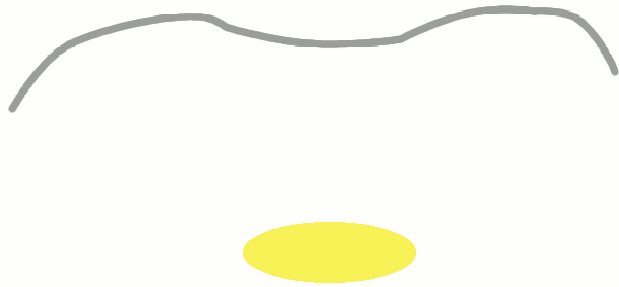


Spectrogramme 3D avec des couleurs.

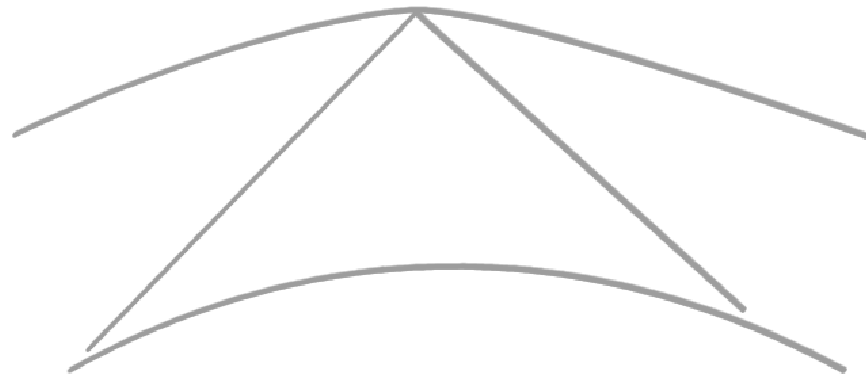
Signal basse fréquence entre 0 et 8 kHz de la radio DRM RTL 5.990 MHz



Analogie entre les réflexions sur l'eau et sur les couches ionosphériques



Reflets du soleil déformés
par les rides sur l'eau



Ondes radio perturbées par les
déformations des couches ionosphériques

Quelques explications sur l'analogie entre les reflets et la réception de la radio. Un peu de théorie des ondes

– Les reflets sur l'eau :

L'eau agitée par les rides est un miroir qui déforme le reflet du soleil et on y voit des zones noires. La déformation est telle que l'on ne reconnaît même plus le disque solaire. La disparition de zones de l'image s'explique par la variation de l'inclinaison des rayons réfléchis hors de la zone occupée par le soleil.

Lorsque l'on regarde la nuit les reflets de points lumineux sur des vaguelettes, ils oscillent.

–La réception de la radio

Elle se fait aussi après réflexion des ondes sur une surface déformée.

La source de l'image a le comportement d'un point lumineux.

On montre le cas où l'antenne reçoit l'onde par deux trajets différents :

Si elles s'additionnent avec leur maximums dans le même sens. **C'est l'interférence additive ou constructive.** Il suffit que la différence des trajets soit un multiple de la longueur d'onde λ ce qui équivaut à un déphasage de 2π ou 0.

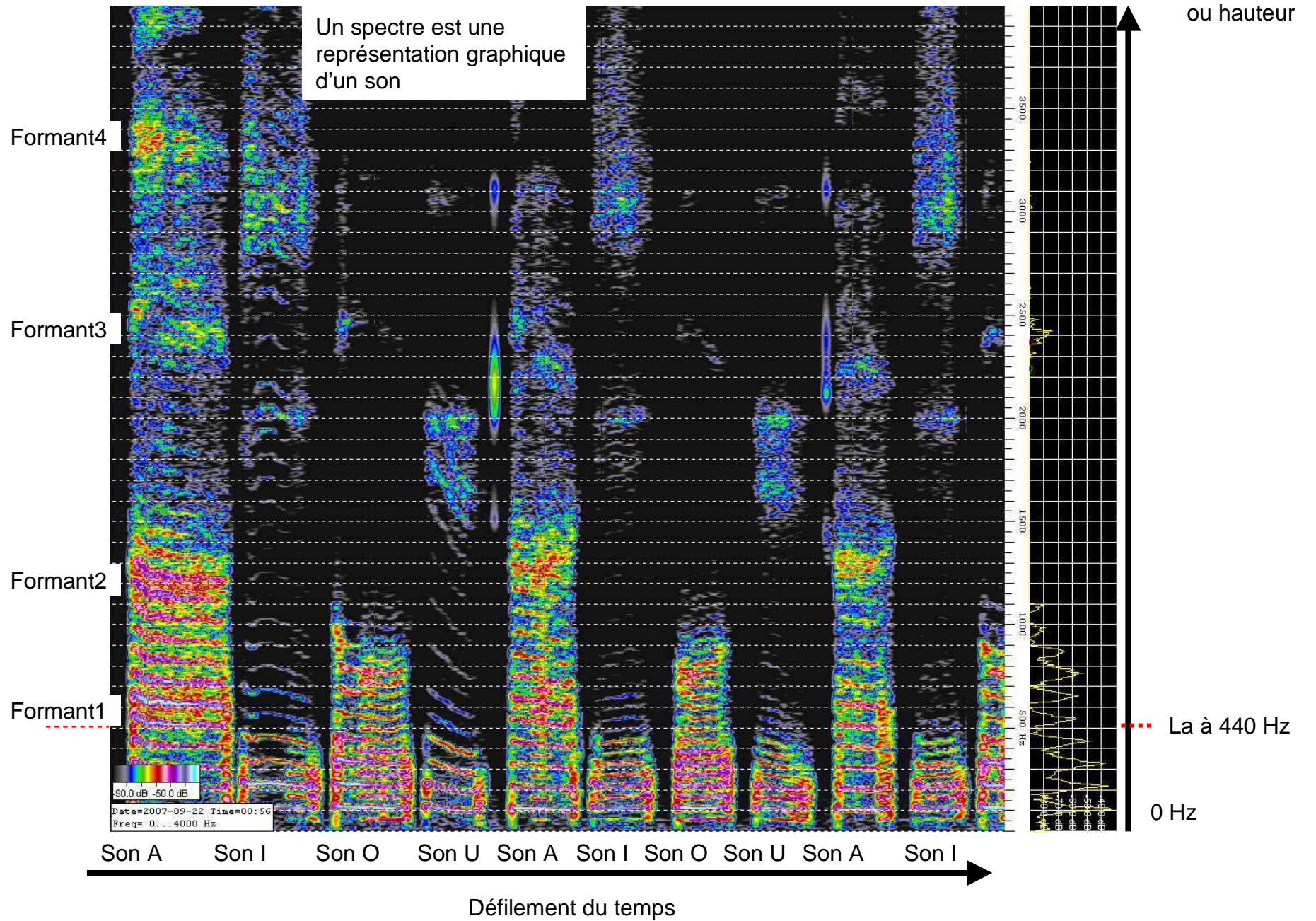
Si elles s'additionnent avec leur maximums dans le sens contraire. **C'est l'interférence soustractive ou destructive.** Il suffit que la différence des trajets soit un multiple de la moitié de la longueur d'onde $\lambda/2$. ce qui équivaut à un déphasage de π ou de $-\pi$

Le résultat est que si la déformation de la couche réfléchissante est variable dans le temps comme les rides sur l'eau, alors on aura une variation de la réception qui sera analogue.

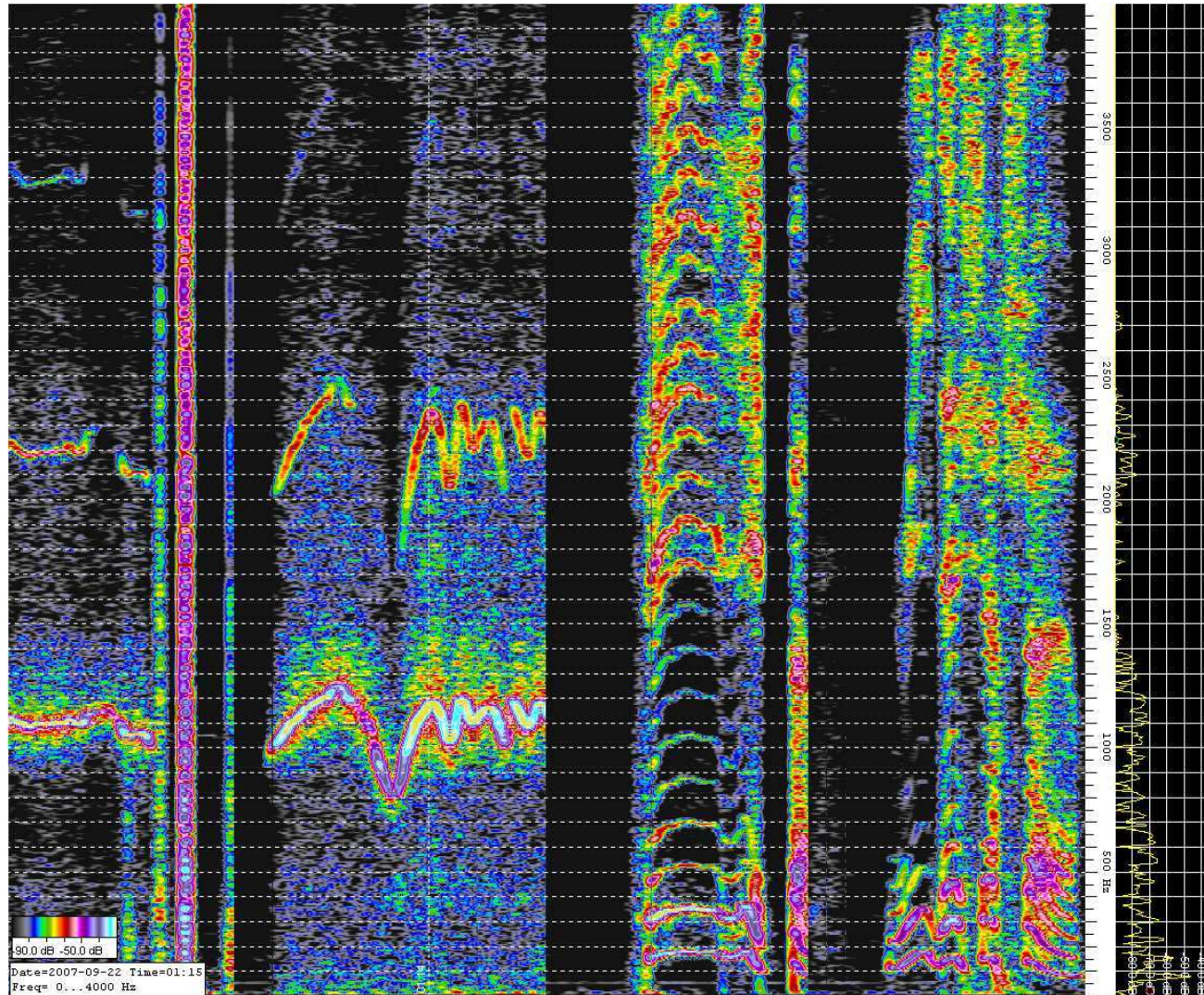
Quand les phénomènes d'interférence dépendent de la fréquence, on dira que l'on a des évanouissements sélectifs. Ces derniers pourront dépendre en plus du temps.

Ces interférences peuvent se produire sans déformation des couches, on peut avoir des trajets multiples par des différences de température, l'effet du champ magnétique etc.

Le logiciel qui voit les sons : Spectrumlab et dessine des spectrogrammes



Sons divers



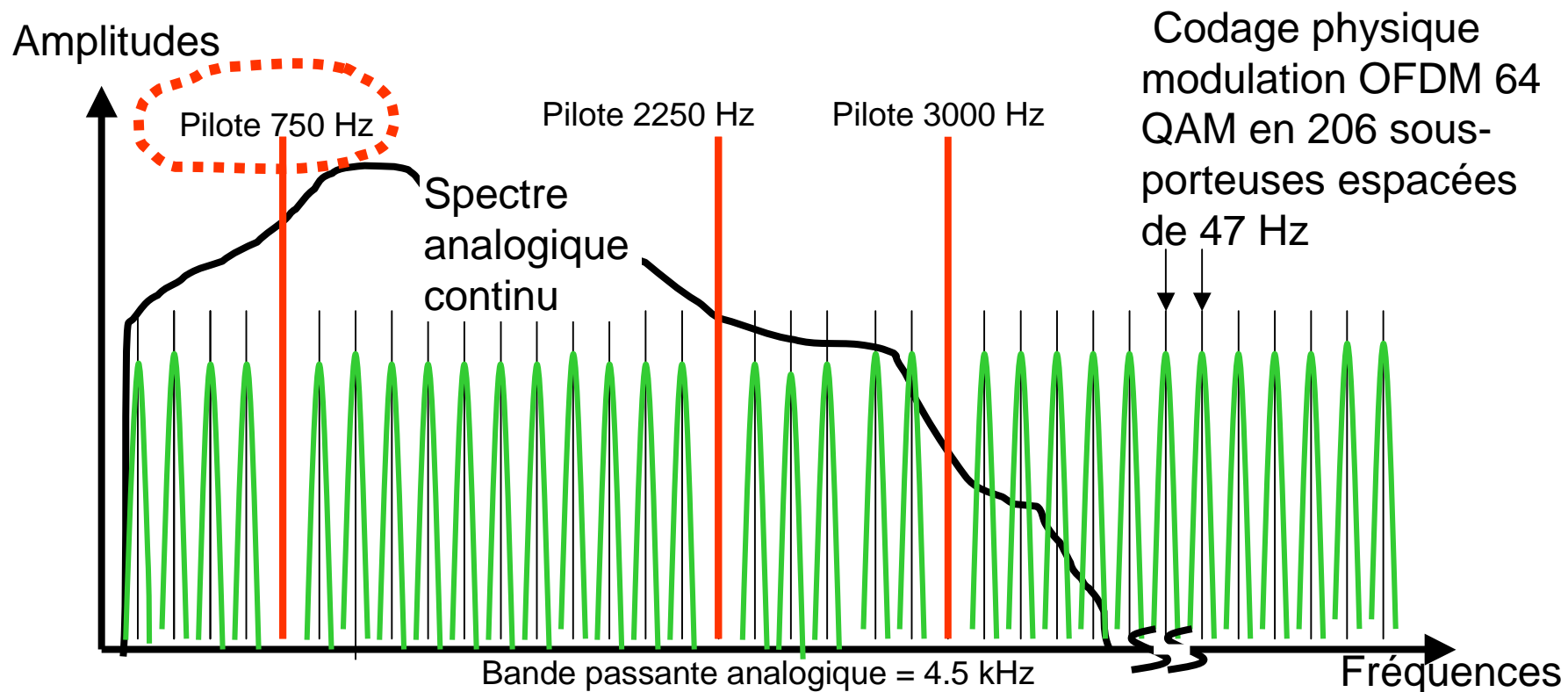
Sifflement
percussions

Sifflement avec
vibrato

Philippe
percussions

Nuit des
chercheurs

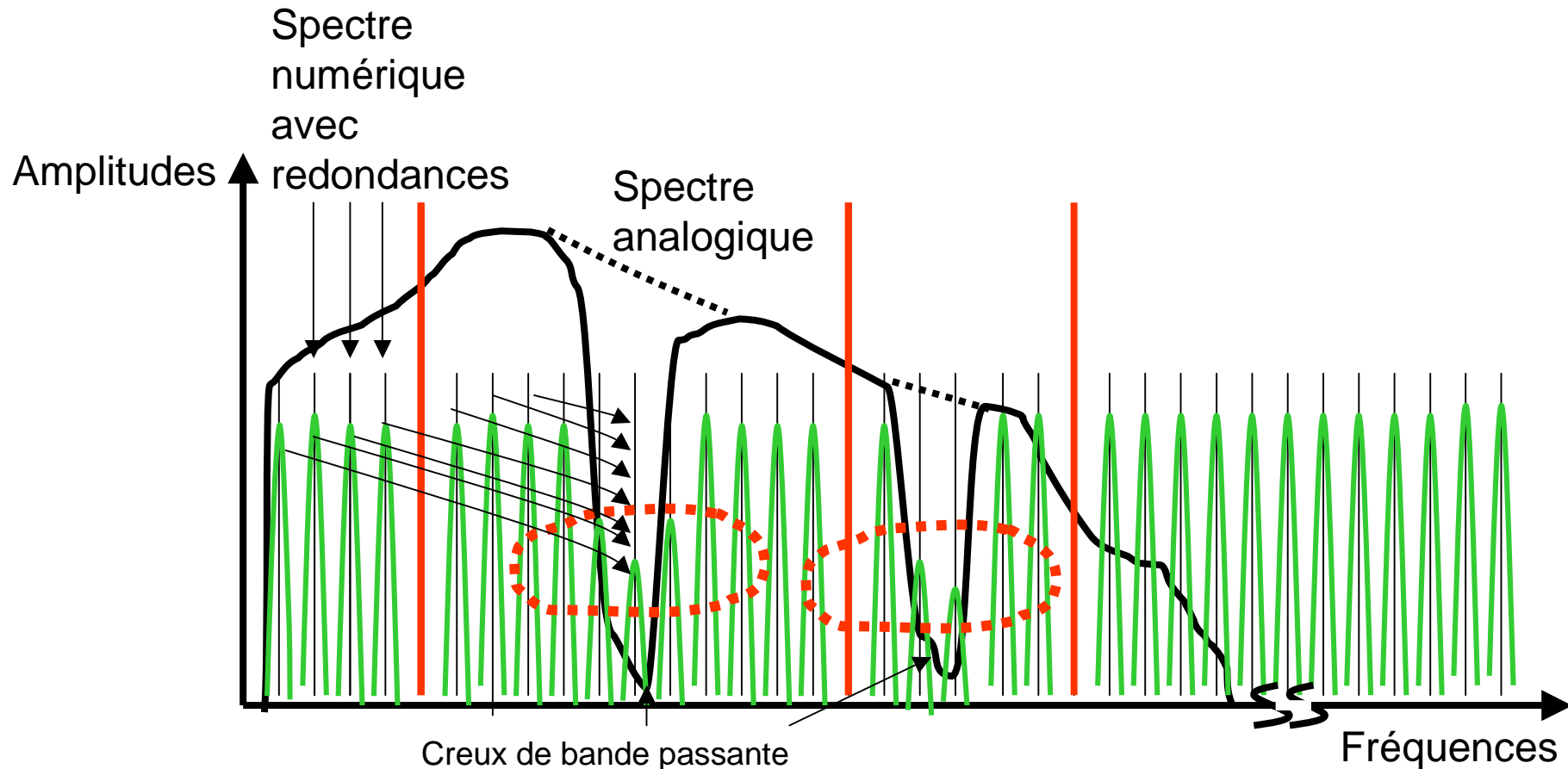
Comparaison des spectres transmis entre la radio analogique et la DRM



Légendes :

- Les **pilotes** à **750 Hz**, 2250 Hz et 3000 Hz sont des **références très stables non modulées** qui servent au logiciel **DREAM** pour caler le décodage. Leur importance nécessite de les transmettre avec plus d'amplitude que le reste. **La mesure de leur perturbations sert à voir les mouvements et les transformations de l'ionosphère**
- OFDM = Orthogonal Frequency division Multiplexing : Multiplexage en fréquences
- 64QAM = Quadature Amplitude Modulation : Modulation en phase et amplitude avec une constellation ayant 64 états

Effet des évanouissements sélectifs suivant le mode analogique et numérique



En transmission analogique ; un creux de bande passante peut rendre le son incompréhensible.

En transmission DRM, on transmet le signal avec de la redondance sur toutes les sous-porteuses : c'est à dire plus que nécessaire et avec du code correcteur d'erreur de façon à pouvoir corriger en cas de creux de bande passante, de confusion de signal par trajets multiples, et de décalage de fréquence par effet Doppler.

Description des expériences

Deux systèmes indépendants permettent de recevoir une émission DRM de la station radio RTL sur 5990 kHz en ondes courtes qui fait partie des longueurs d'ondes de la bande européenne 49m.

- Un système large bande qui reçoit sur une bande de 2 kHz

Pour enregistrer les évanouissements sélectifs glissants, les battements de chemins multiples, les transitions jour/nuit.

- Un système bande étroite qui reçoit sur une bande de 2 Hz

le pilote à 750 Hz et avec une très grande stabilité de fréquence contrôlée par l'horloge atomique de la BBC

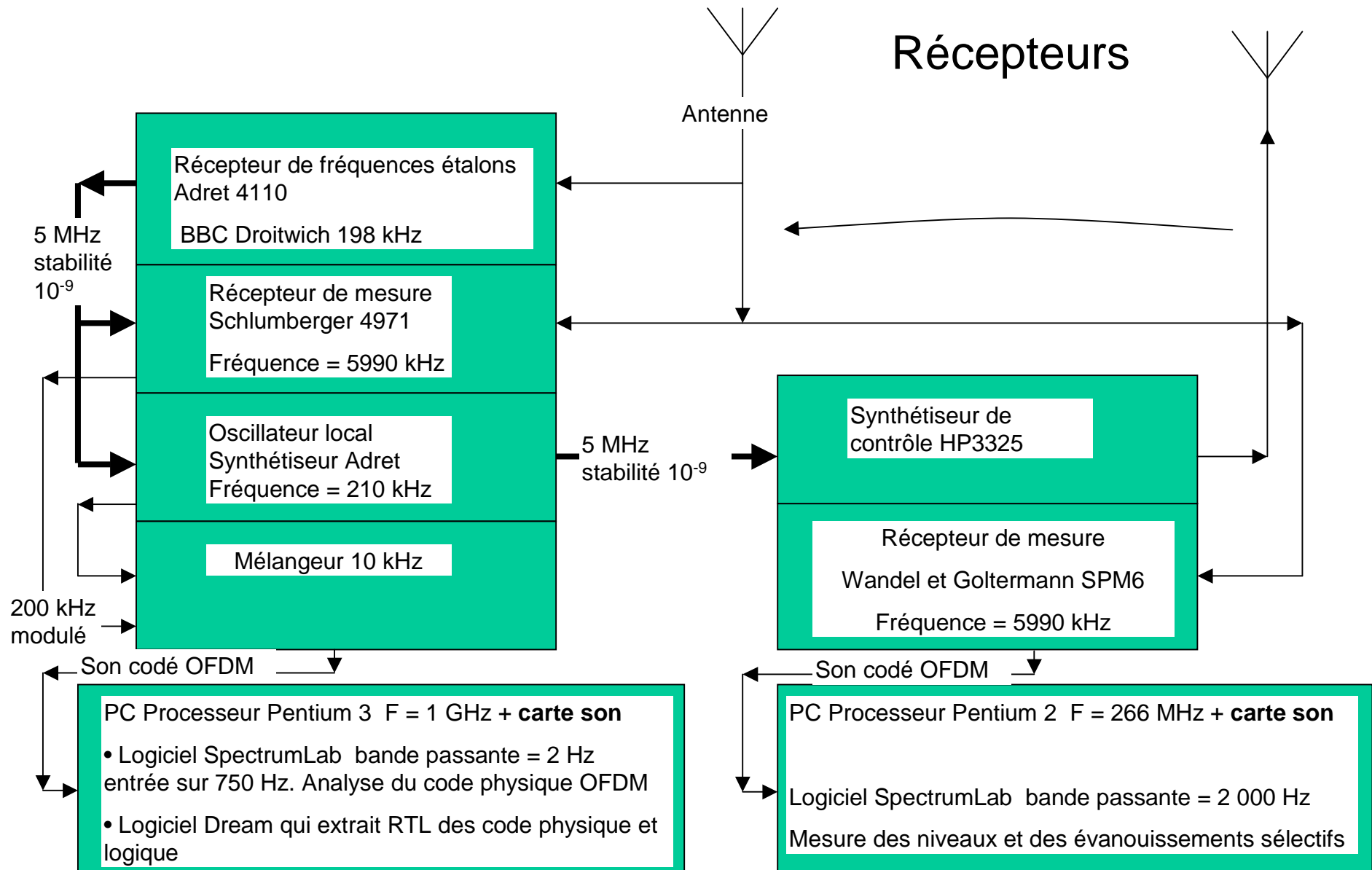
Pour enregistrer les ondes de gravité, les battements qui correspondent

aux trajets multiples, les dérives de fréquences qui correspondent

au lever du soleil : augmentation de hauteur des couches ionosphériques

au coucher du soleil : diminution de hauteur des couches ionosphériques

Récepteurs



Récepteur bande étroite : mesure des perturbations du pilote 750 Hz du signal DRM

Récepteur bande large

Analyse de quelques enregistrements

Superposition de l'analyse à bande étroite et de l'analyse à large bande

- Coupure : la nuit : Problème de milieu de propagation : pas assez d'ions car absence de soleil : ionosphère transparente non réfléchissante : les ondes passent au dessus
- **Le jour au début** : L'ionosphère devient réfléchissante. Trajets multiples : ondes de Pedersen. Peu de création d'ions dans la couche D alors peu absorbante donc signaux forts mais beaucoup de variations de niveau car trajets multiples : les ondes se battent avec en plus des évanouissements sélectifs dus aux effets dispersifs suivant les trajets de propagation. Il y a des vents ionosphériques horizontaux et des ondes de gravité qui font une sorte de turbulence comme celle de l'air chaud.
- La couche réfléchissante est la couche E qui monte et si on a deux endroits qui ne montent pas à la même vitesse à cause des ondes de gravité qui introduisent un gradient de vitesse, on a deux effets Doppler différents qui battent.
- Les phénomènes de dédoublement sont forts pendant les montées et descentes et les pentes dans les évanouissements sélectifs s'inversent entre la montée et la descente.
- **Milieu de journée** : Minimum de signal à cause du maximum d'absorption de la couche D qui reçoit le maximum de soleil mais moins de trajets multiples et hauteur de la couche stabilisée (Pas d'effet Doppler qui modifie la fréquence).
- **Fin de journée** ; Moins de couche D donc signal plus fort, on a des ondes de gravité qui créent du Doppler et on a des chemins de Pedersen. La transition de fin de journée est beaucoup plus progressive que celle de début de journée.
- **Nuit** : Coupure progressive.
- Effet des évanouissement sélectifs pour la DRM : on a une redondance des signaux : les sous porteuses transmettent leur partie et un peu de celles d'à côté. Si une sous-porteuse disparaît celle d'à côté prend le relais mais attention à la différence d'Internet on n'a pas de réémission. Il n'y a pas d'accusé de non-réception qui déclenche une réémission. On est en mode diffusion unidirectionnel et non en mode circuit bidirectionnel

Synthèse des enregistrements pour une journée typique du mois de septembre

