

Etude de l'ionosphère par utilisation opportuniste d'une modulation DRM

Philippe MALIET

Hervé Sizun

Observation Radio Pleumeur Bodou

Plan

- Introduction
 - Observation Radio Pleumeur Bodou
 - L'ionosphère
 - Caractéristiques principales
 - Propriétés électriques
 - Radiocommunication par réflexion ionosphérique
 - Techniques d'investigation
- L'expérimentation
 - La liaison étudiée
 - La DRM
 - Logiciels utilisés
 - Spectrumlab
 - Dream
 - Le système de réception
- Résultats
 - Bande étroite
 - Large bande
 - Comparaison Bande étroite large bande
- Conclusion

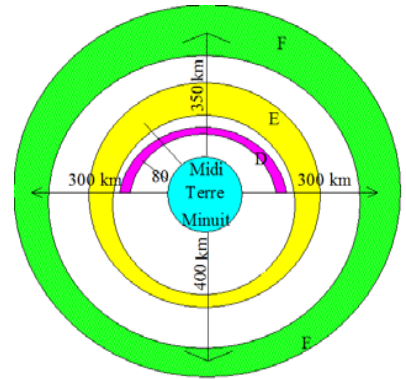
Introduction

Observation Radio Pleumeur Bodou



- Association
- Promouvoir et animer sur le site du CTS des activités centrées sur l'observation des fréquences radioélectriques
 - Pédagogie et recherche axées sur la radioastronomie, l'ionosphère, ...
 - Observations: émissions satellitaires, liaisons iono, Galiléo,...
- Réhabilitation et rééquipement d'une ou plusieurs antennes présentes sur le site à des fins de radioastronomie
- Installation d'équipements spécifiques (Galileo, ...)
- Animation pédagogique, formation, programme de recherche, collaboration avec les institutionnels, ...
- Site Web: : <http://www.obsradio.asso.fr>

L'ionosphère



- Caractéristiques principales
 - Région de la haute atmosphère (75-1000 km) où les charges (+,-) résultant d'une photo-ionisation existent en quantité suffisante pour influencer la trajectoire des OEM
 - Divisée en 3 couches principales
 - La couche D (75 - 95 km) : absorption
 - La couche E (95-150 km) : couche réfléchissante
 - Couche E normale
 - Couche E sporadique
 - La couche F (>150 km): couche réfléchissante
 - La couche F1 (150-210 km) : présente le jour
 - La couche F2 (couche réfléchissante la plus haute et la plus ionisée)

L'ionosphère

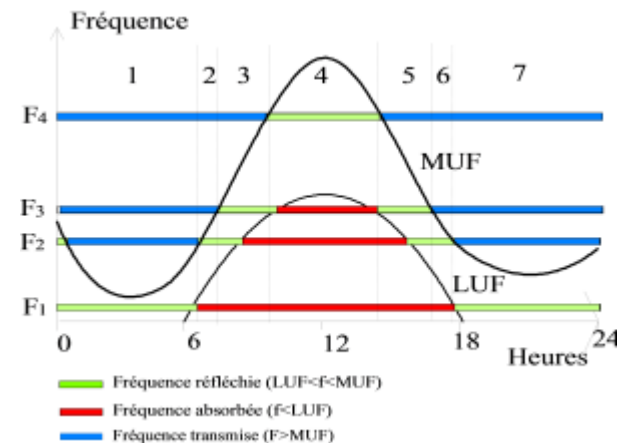
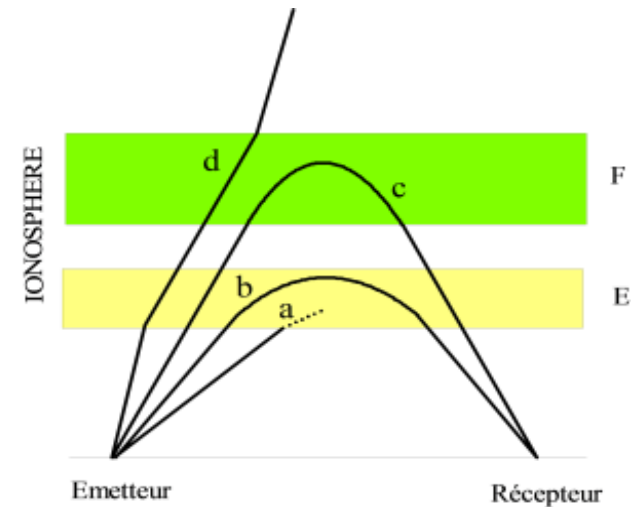
- Propriétés électriques
 - Milieu magnéto-ionique
 - Influence du champ magnétique
 - Milieu anisotrope
 - $V_{\text{groupe}} \neq V_{\text{phase}}$ (dépendante de la direction de propagation)
 - Milieu dispersif
 - Indice de réfraction, fonction de la fréquence

L'ionosphère

- Communication par réflexion ionosphérique

$$LUF < \text{Fréquence} < MUF$$

- MUF : Maximum Useful Frequency
 - Densité maximale de l'ionosphère (fréquence critique)
 - Lieu géographique
 - Heure locale
 - Saison
 - Activité solaire
 - Angle à l'entrée de l'ionosphère
 - Distance de saut
 - Hauteur de réflexion
- LUF : Lowest Useful Frequency
 - Absorption ionosphérique
 - Durée du trajet dans l'ionosphère
 - Couches traversées
 - Affaiblissement maximale tolérable
 - PIRE (émission)
 - Rapport S/B à la réception



Ionosphère

- Etablissement de prévisions des conditions de propagation radioélectrique
 - Objectifs (pour une liaison donnée)
 - Planifier et choisir les antennes
 - Prévoir les fréquences adéquates
 - Prévoir les horaires d'exploitation

L'ionosphère

- Les moyens d'investigation
 - Le sondage en contre bas (vertical ou oblique)
 - fréquences critiques des différentes couches
 - Hauteurs virtuelles de réflexion
 - Le sondage vertical en contre haut
 - Fréquence critique de la couche F2
 - Le sondage par rétrodiffusion
 - Détection au-delà de l'horizon
 - Détermination de la hauteur des vagues au-dessus de l'océan
 - Le sondage par diffusion incohérente
 - Densité électronique
 - Température ionique et électronique
 - Vitesse des ions le long du champ magnétique
 - ...
 - Utilisation opportuniste d'une modulation DRM sur une liaison ionosphérique
 - Déterminer les faibles variations de fréquence du signal reçu
 - En bande étroite (2Hz)
 - En large bande (10KHz)
 - Objet de la présente communication

La liaison expérimentale

L'expérimentation

- La liaison étudiée
 - Emetteur
 - Ismaning (Allemagne): proche de Munich
 - $11^{\circ}04'47''$ E
 - $48^{\circ}13'11''$ N
 - BR5akt
 - 6085 kHz
 - 50 kW
 - Récepteur
 - Keranstrou- Ploumilliau (France): proche de Lannion
 - $03^{\circ}32'06''$ E
 - $48^{\circ}42'18''$ N
 - Distance Emetteur-Récepteur: 1120 km

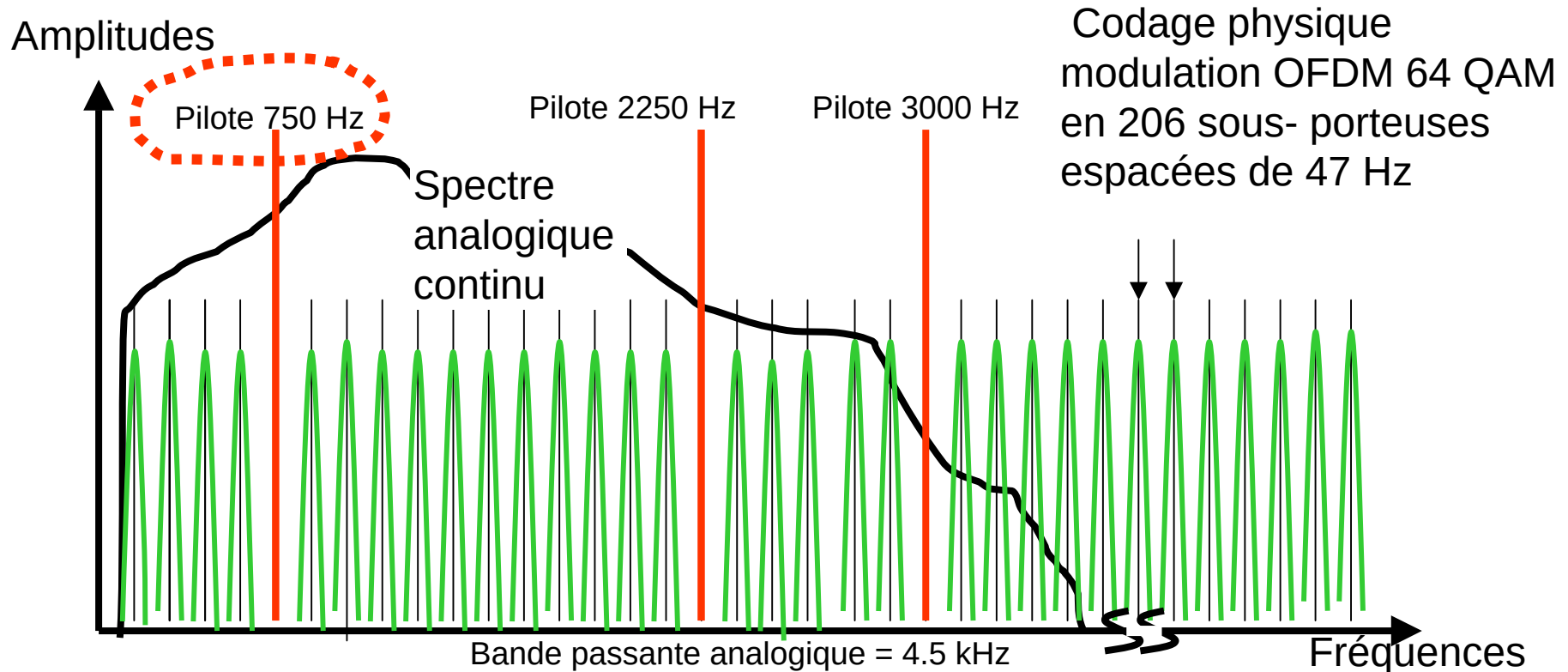
L'expérimentation

- Digital Radio Mondiale (DRM)
 - Norme de radiodiffusion numérique ($F < 30\text{MHz}$)
 - Permet une large couverture (milliers de km)
 - Avantage / radiodiffusion analogique
 - Amélioration de la qualité du son
 - Identification des stations reçues
 - Faible puissance d'émission
 - Récepteur
 - simple et léger
 - Largeur de bande : 10 KHz
 - Débit : 8-20 kbits/s voire à 72 kbits/s en couplant plusieurs canaux

L'expérimentation

- DRM (suite)
 - Transmission
 - Modulation utilisée : constellation QAM (Quadrature Amplitude Modulation)
 - Codage : OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
 - Robustesse du signal face aux échos destructeurs de la propagation
 - Utilisation de code correcteur
 - en cas de creux de bande passante,
 - de confusion de signal par trajets multiples,
 - de décalage de fréquence par effet Doppler
 - Principe:
 - Obtenir une densité spectrale uniforme en répartissant le flux total du signal numérique sur de nombreuses sous-porteuses modulées individuellement en QAM
 - Les phases des sous-porteuses sont orthogonales entre-elles dans le but de renforcer la diversité du signal par rapport aux échos de propagation.

Comparaison des spectres transmis entre la radio analogique et le son codé de la DRM

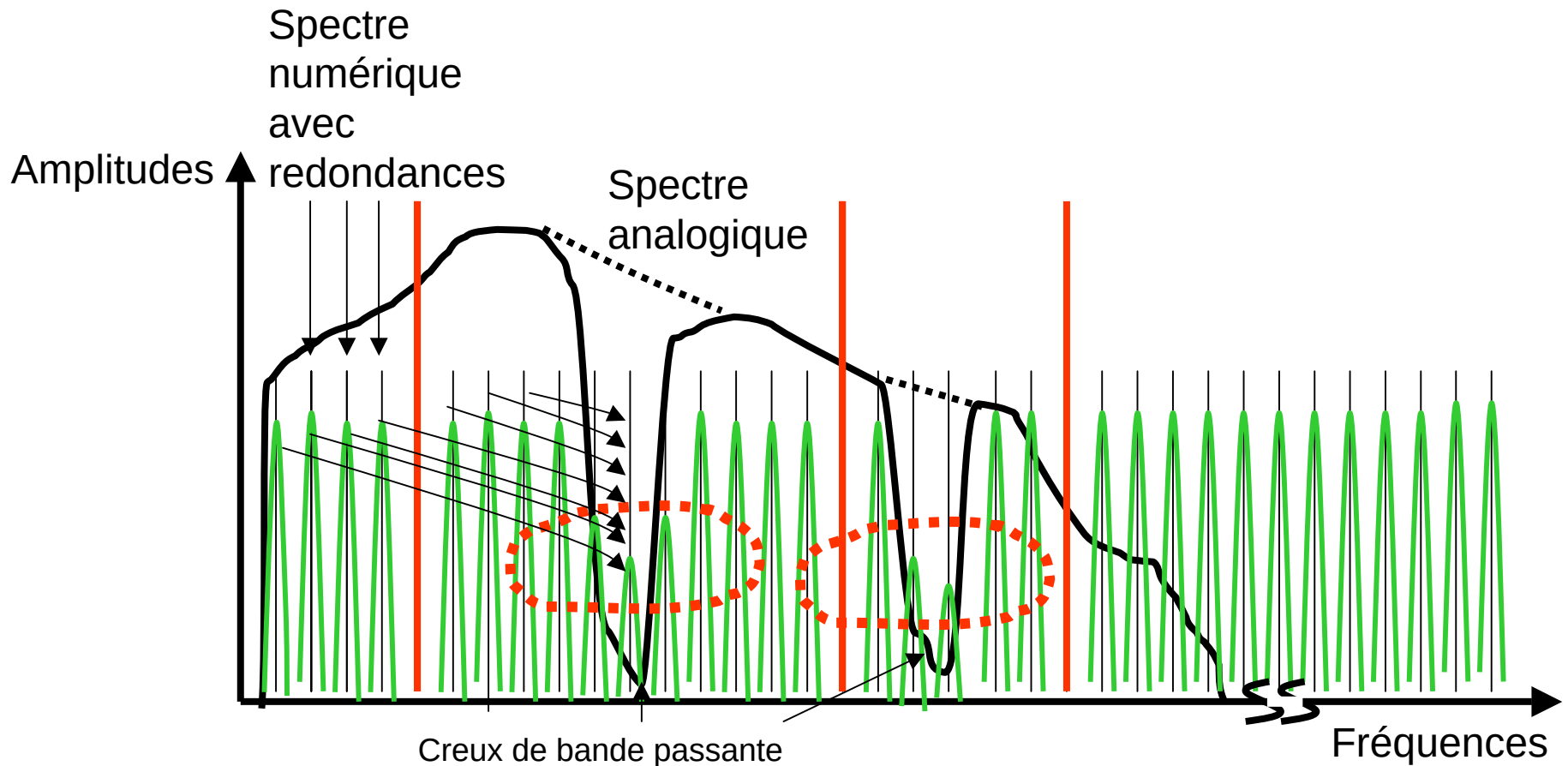


Légendes :

- 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

Bande passante équivalente de la DRM =
12 kHz débit binaire 17kbits / seconde

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.

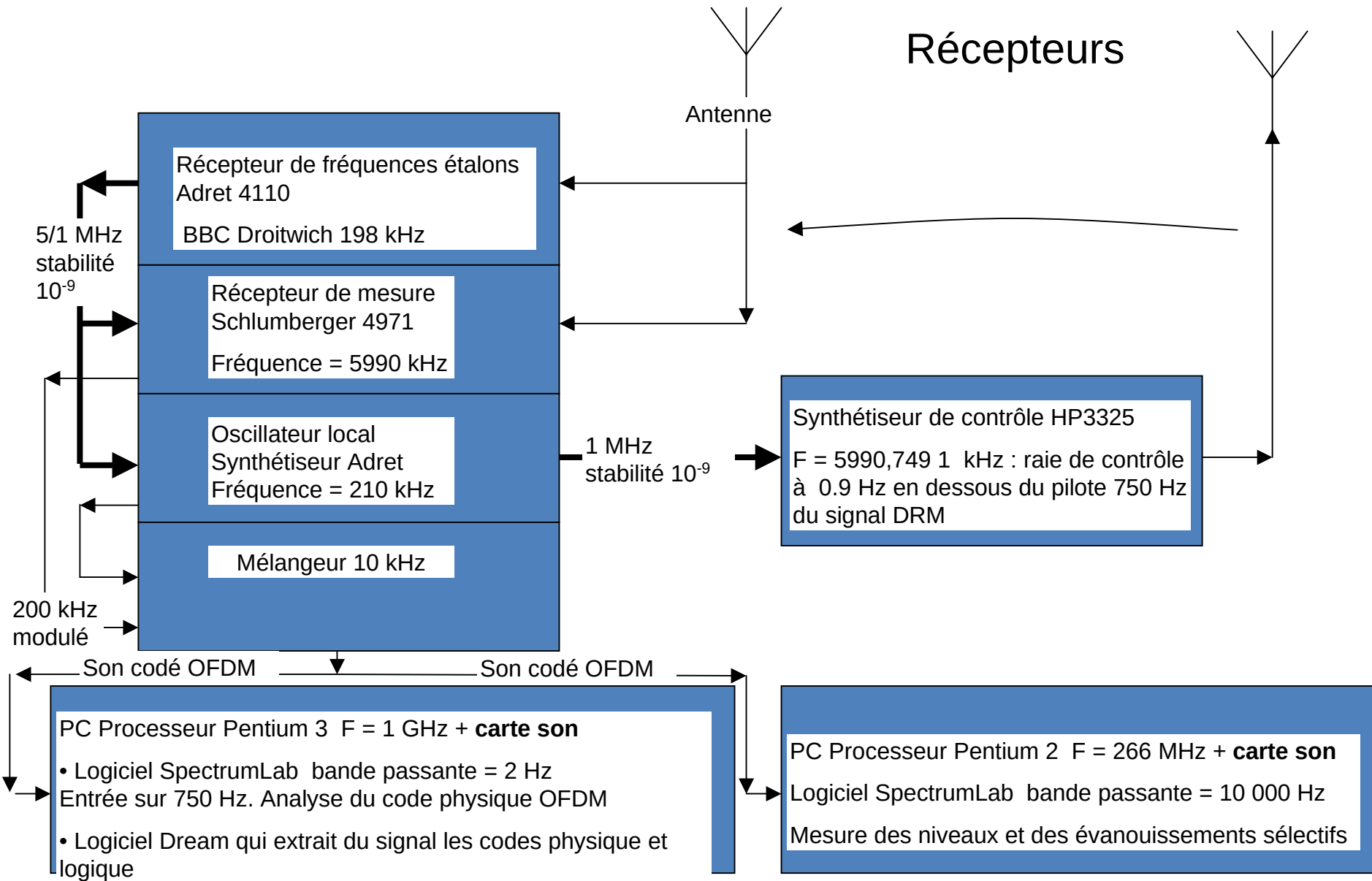
L'expérimentation

- Logiciels utilisés
 - DREAM
 - Déterminer la station
 - Se caler sur les différentes sous-porteuses
 - Assurer ainsi le décodage
 - Extraction de paramètres
 - Fourniture du signal à une carte son
 - SPECTRUMLAB
 - Signal d'entrée: signal numérisé à l'aide d'une carte son
 - Analyseur de spectre (FFT)
 - Graphique (niveau du signal, temps, fréquence)

L'expérimentation

- Les signaux codés en OFDM servent de sonde pour étudier les variations de l'ionosphère
 - Un système Bande étroite (2 Hz)
 - Mesure des perturbations du pilote 750 Hz du signal DRM
 - Un système Large bande (10 kHz)
 - Mesure des niveaux et des évanouissement sélectifs

Récepteurs



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

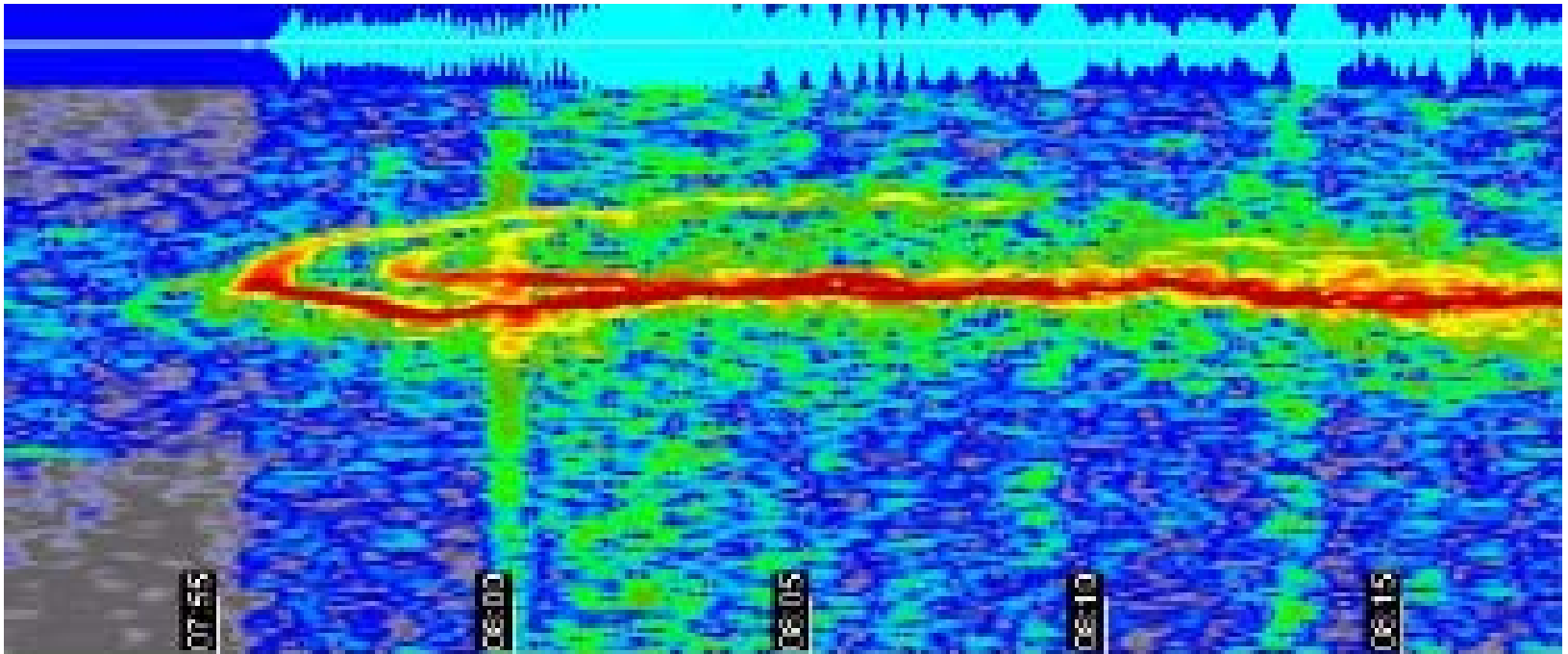
Réception bande large

Résultats

- Réception en bande étroite (2 Hz)
- Réception en large bande (10 kHz)
- Comparaison bande étroite large bande

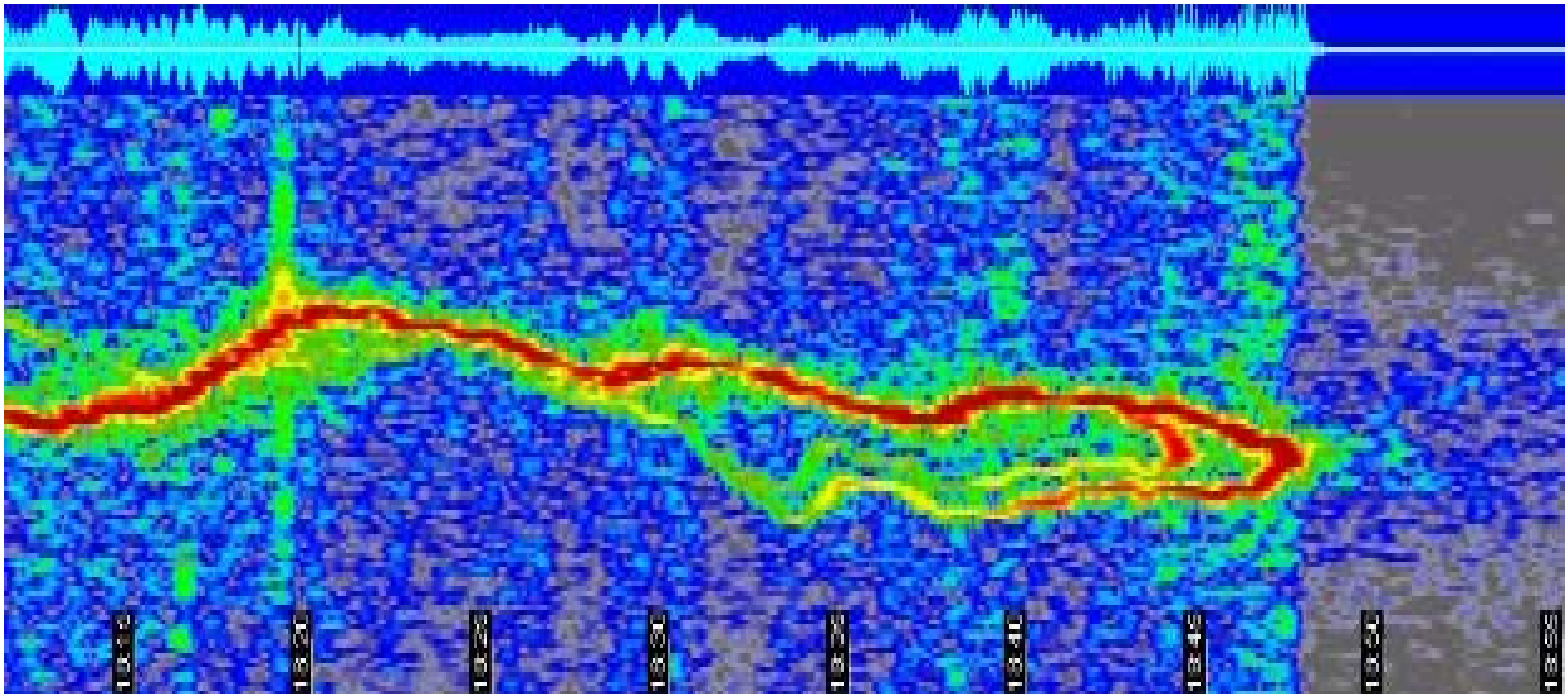
Bande étroite

- Crochet d'ouverture (matin)



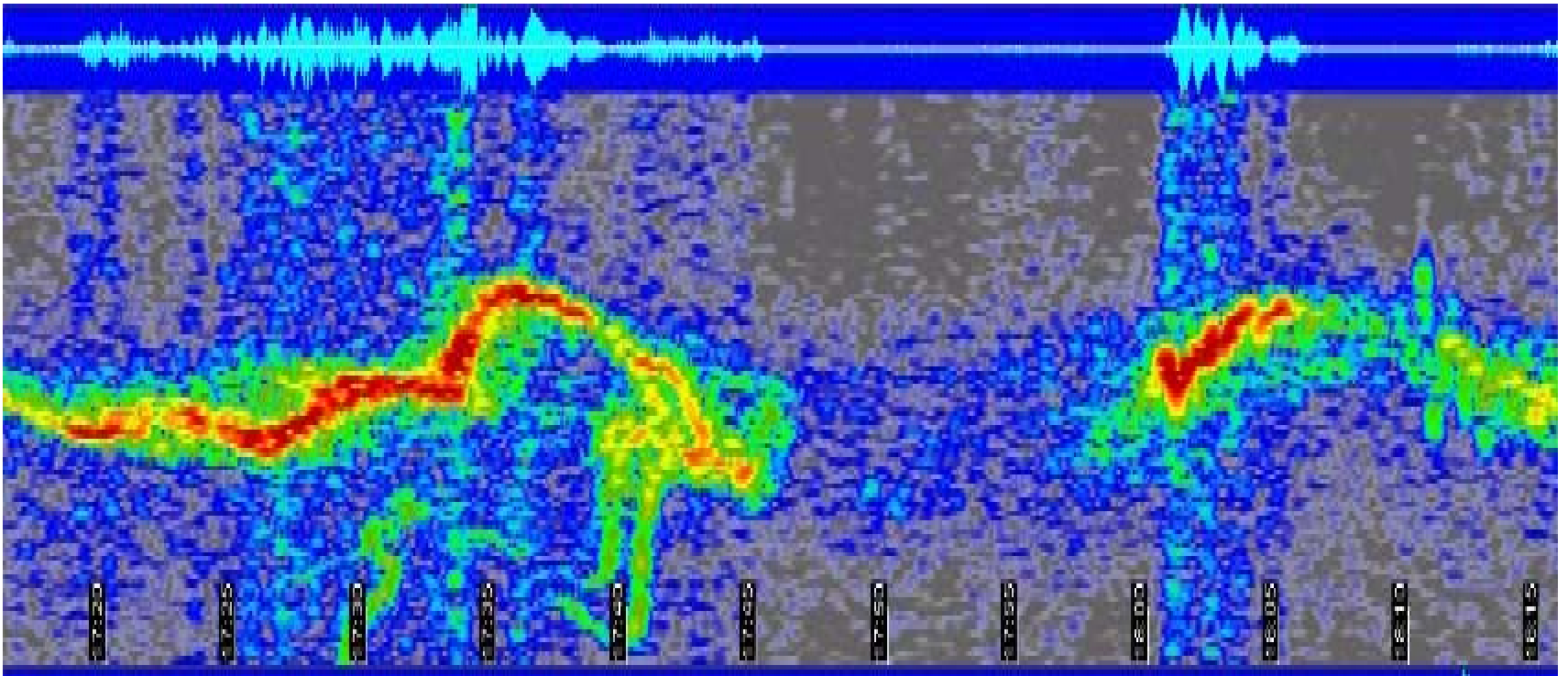
Bande étroite

- Crochet de fermeture (soir)



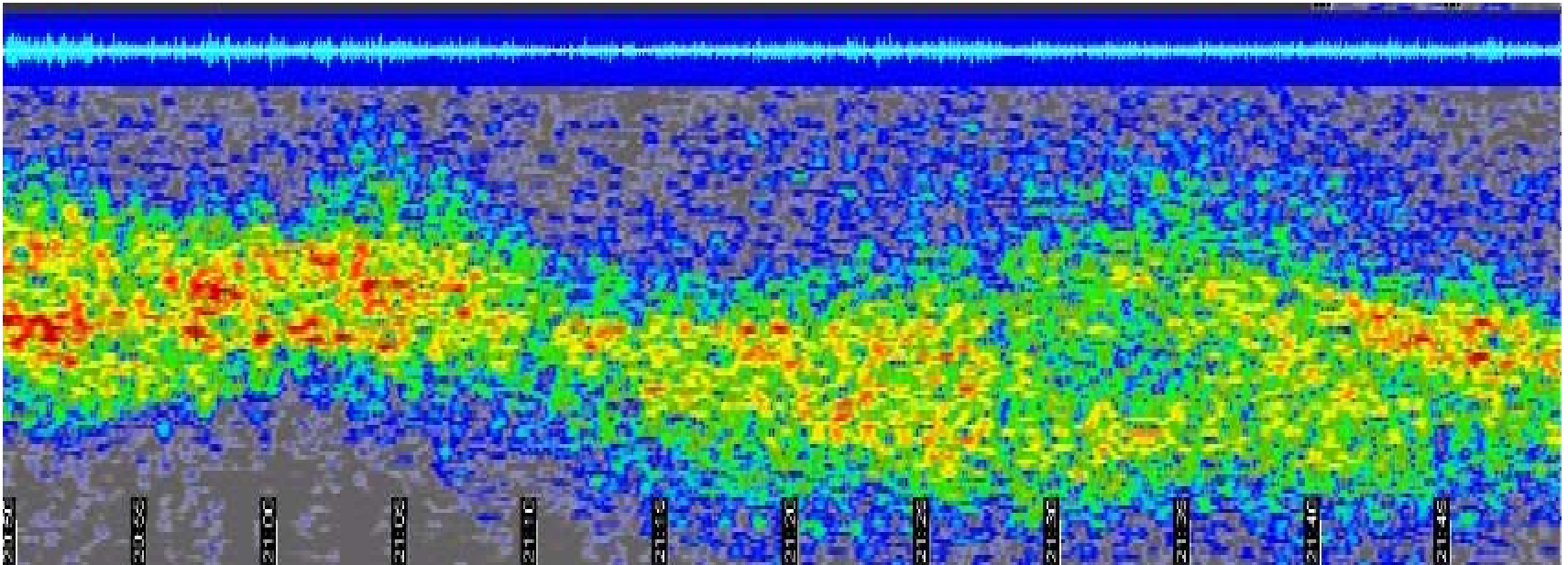
Bande étroite

- Phénomène d'absorption



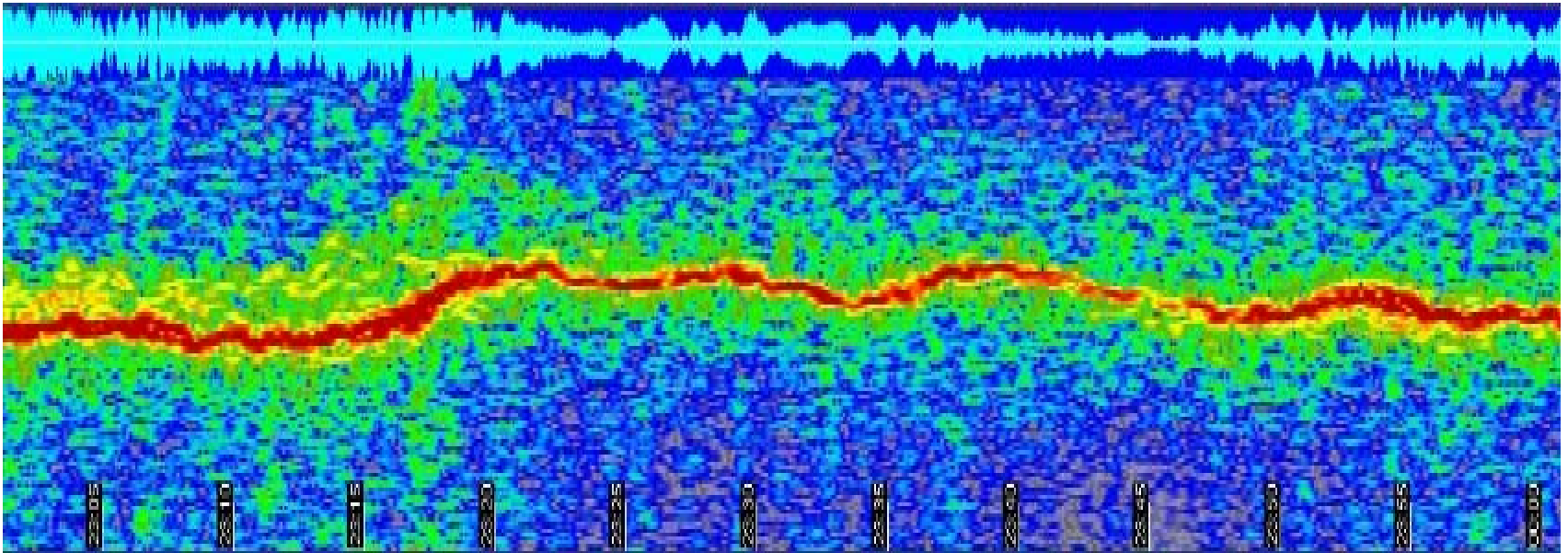
Bande étroite

- Phénomène de diffusion



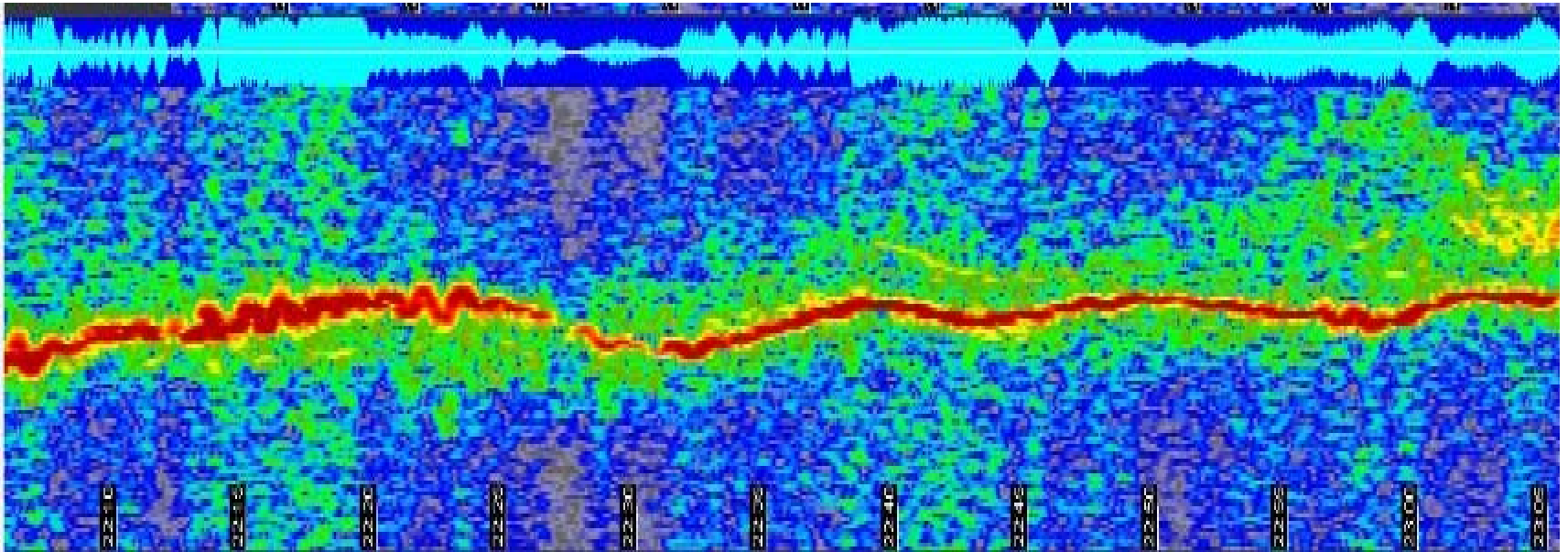
Bande étroite

- Passage d'onde de gravité



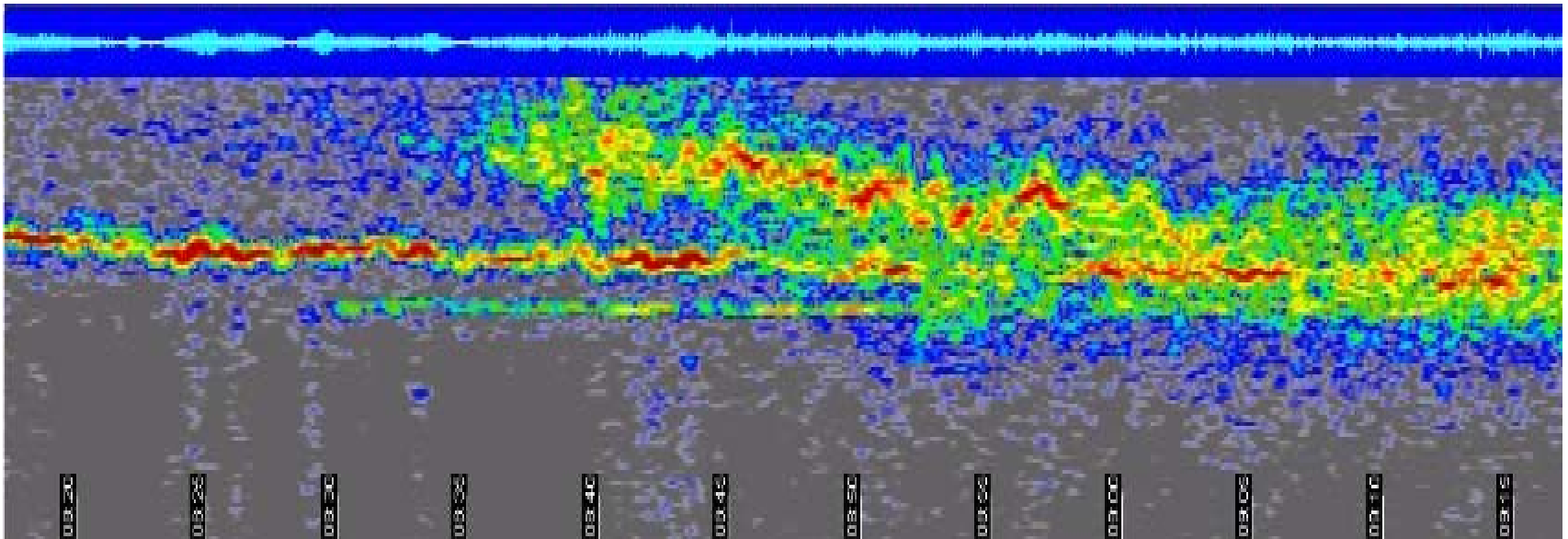
Bande étroite

- Variation de phase



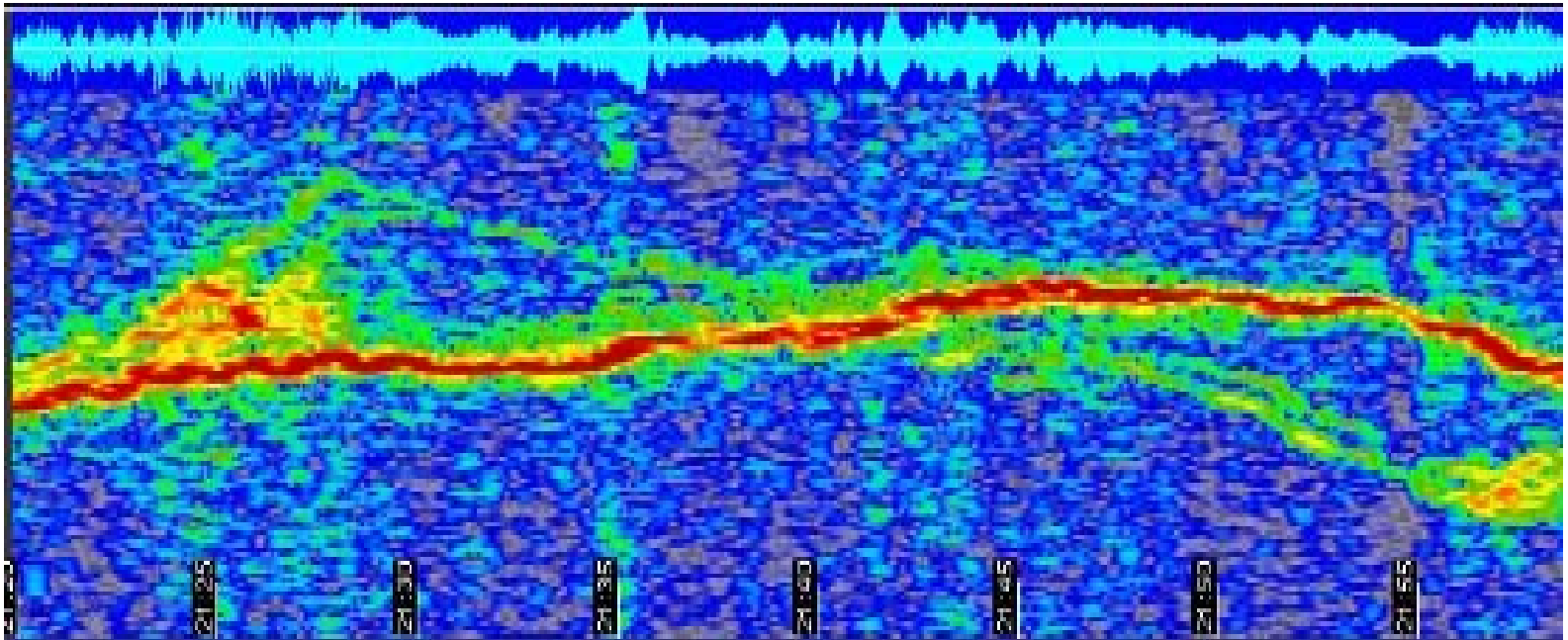
Bande étroite

- Présence de trajets multiples



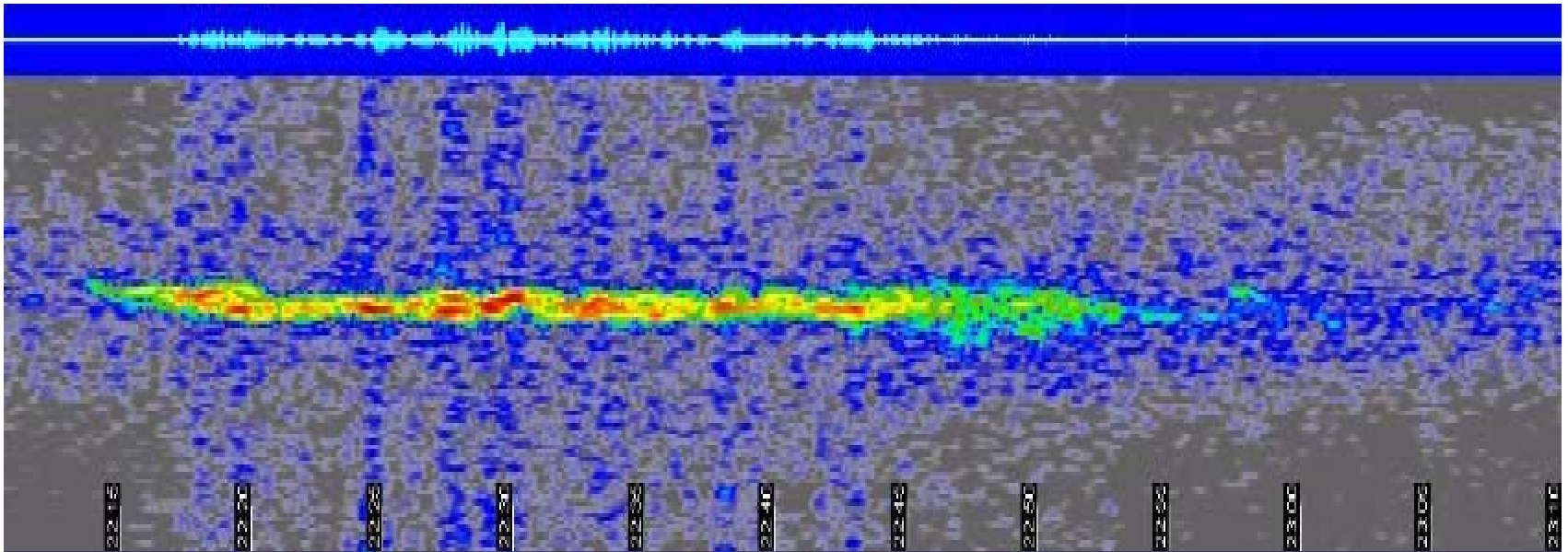
Bande étroite

- Présence de trajets multiples



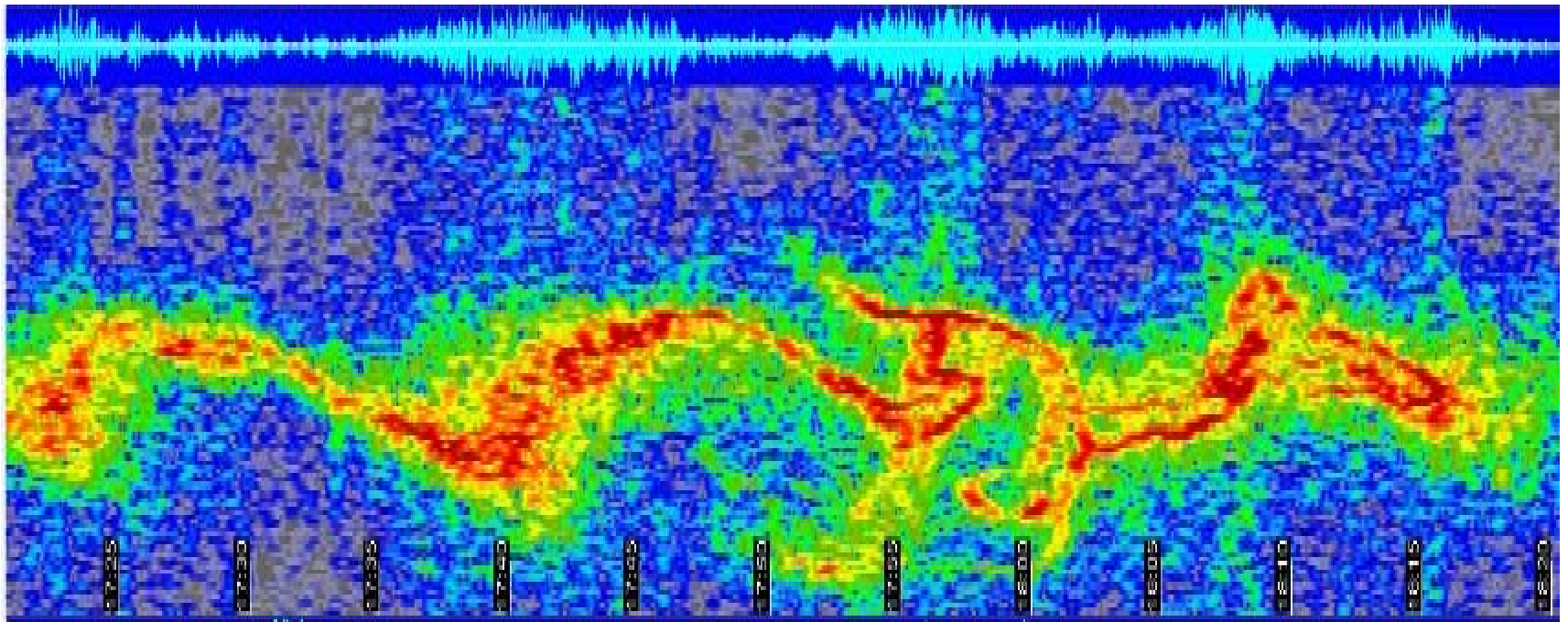
Bande étroite

- Réflexion sur un nuage de plasma



Bande étroite

- Événement complexe



Analogies

- Réflexion sur la mer
- Réflexion sur l'ionosphère

Réflexion sur la mer

La surface de la mer agitée par les rides, les vagues, est un miroir qui déforme les reflets du soleil



Apparition de zones noires

Déformation du disque solaire due à la variation de l'inclinaison des rayons réfléchis

Réflexion sur l'ionosphère

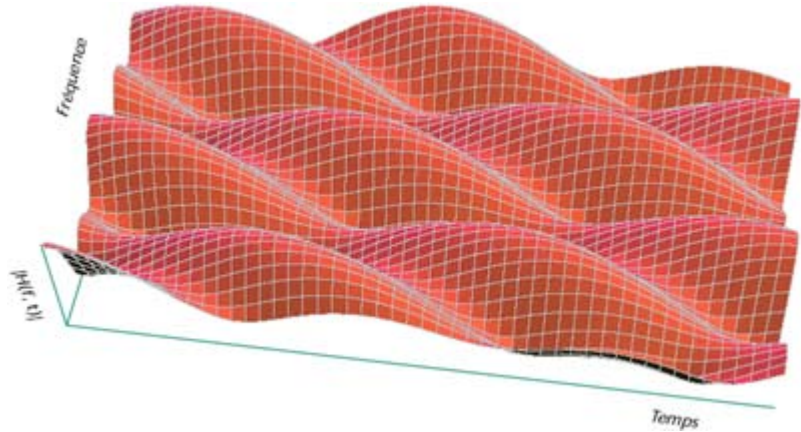
- Réflexion sur une surface déformée
 - Perturbations des ondes radio réfléchies
 - Interférences positives
 - Interférences négatives
- Déformation variable dans le temps
 - Variabilité de la réception radio

Si les interférences dépendent de la fréquence

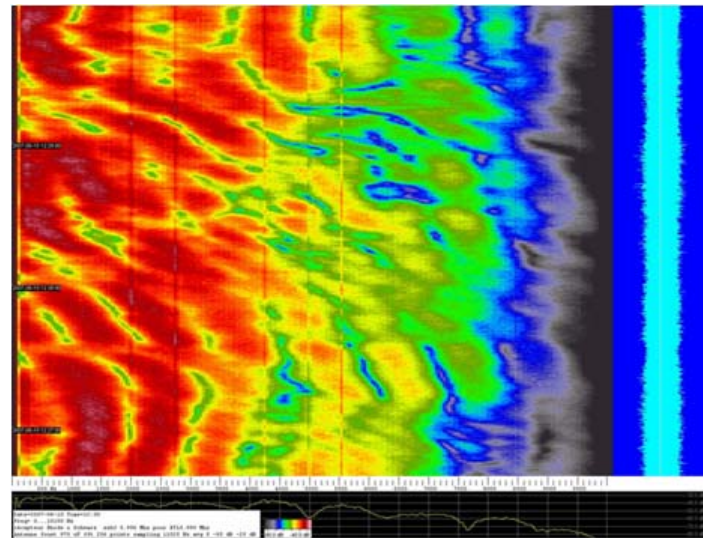
- Evanouissements sélectifs en fréquence

Réflexion sur l'ionosphère

- Spectrogramme 3D avec des surfaces montrant la déformation du spectre en fonction du temps

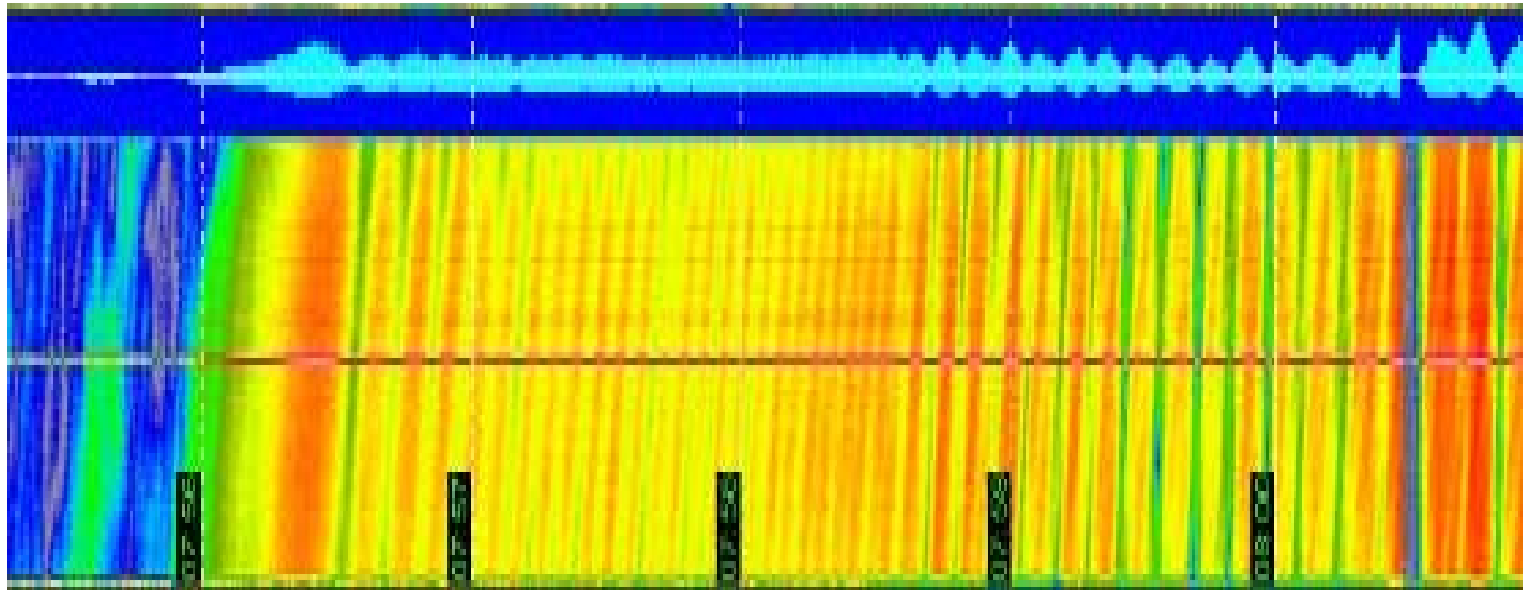


- Spectrogramme 3D avec des couleurs.



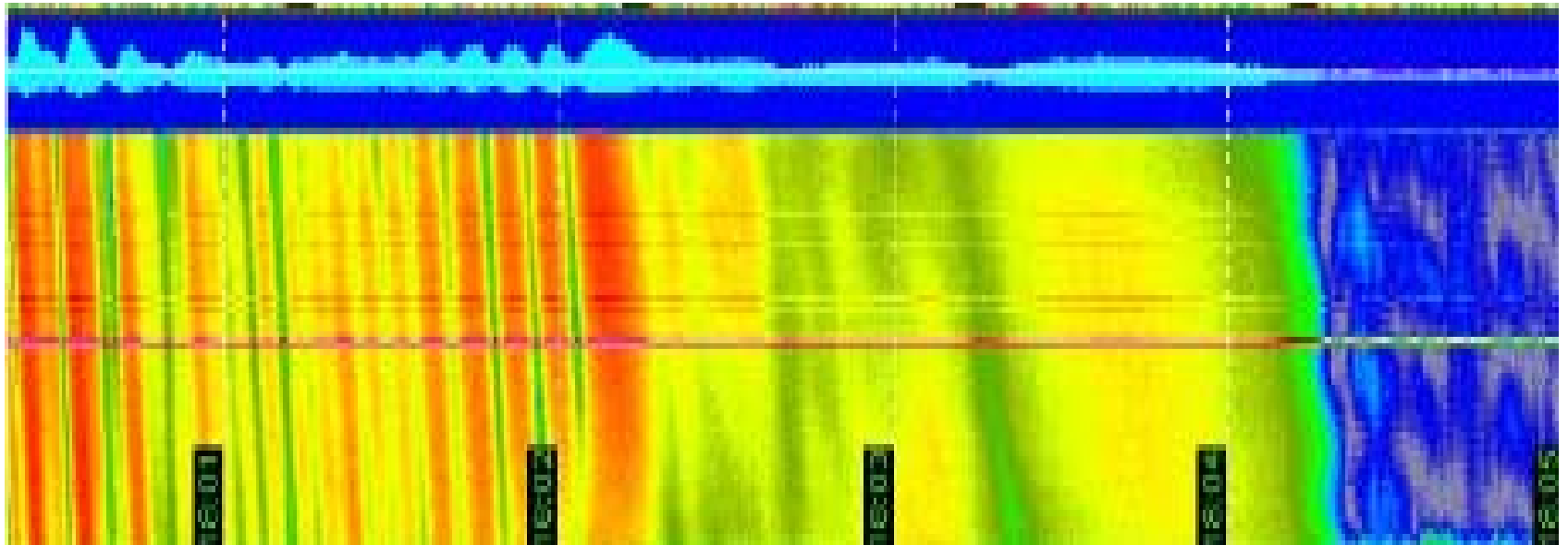
Large bande

- Crochet d'ouverture
 - Fading sélectif avec fréquence croissante



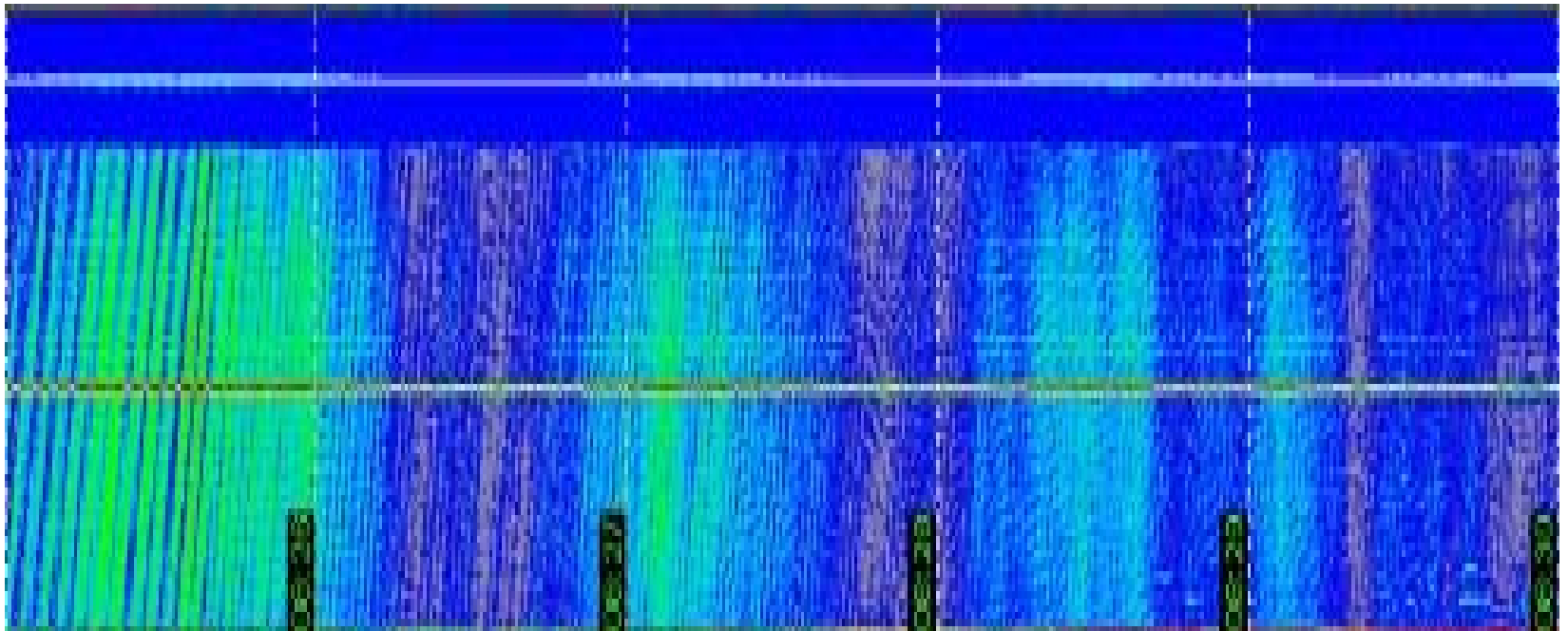
Large bande

- Crochet de fermeture (soir)
 - Fading sélectif avec fréquence décroissante



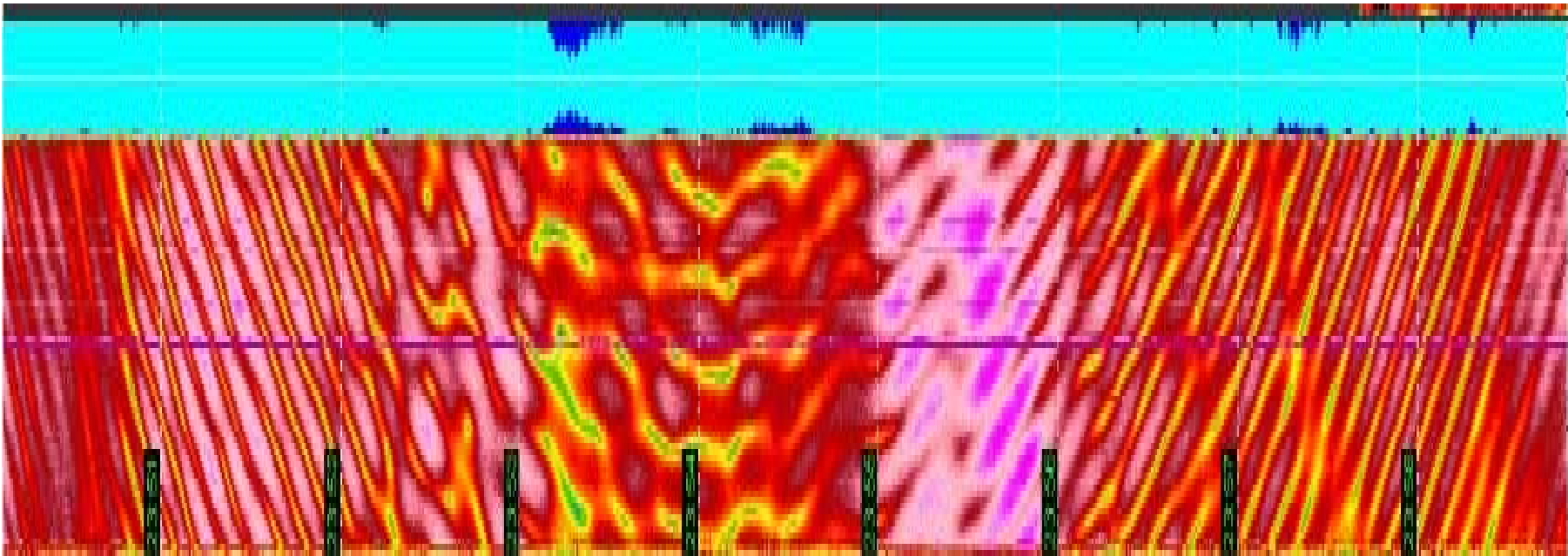
Large bande

- Rides de faible amplitude



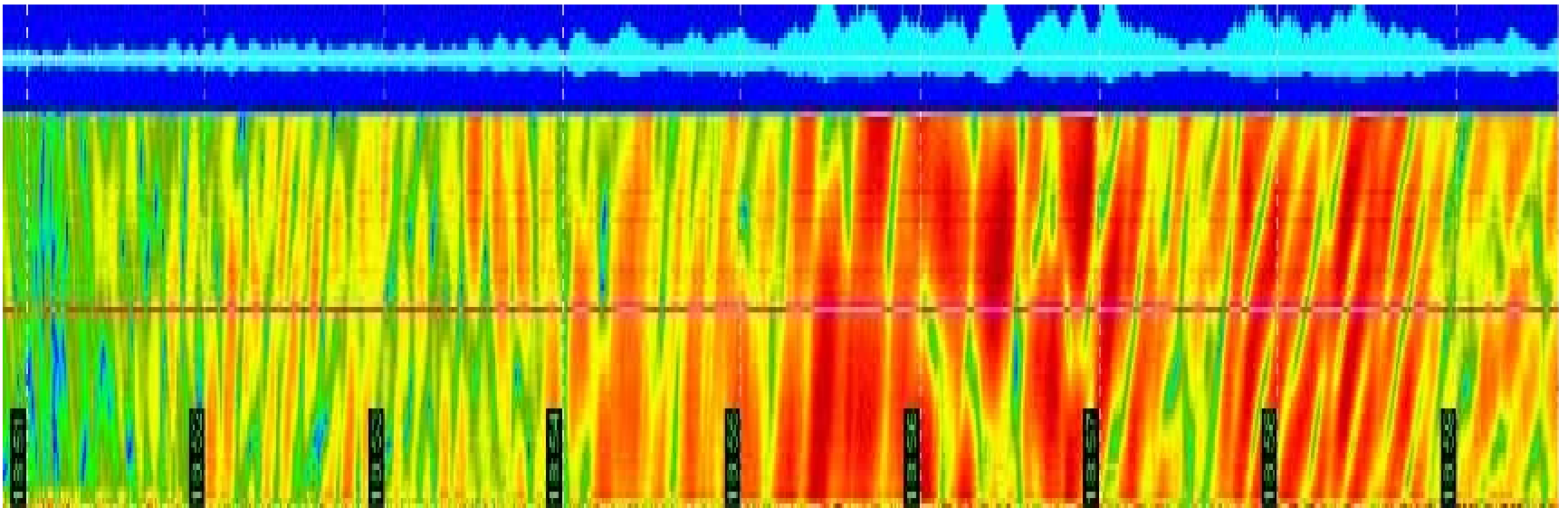
Large bande

- Événement complexe



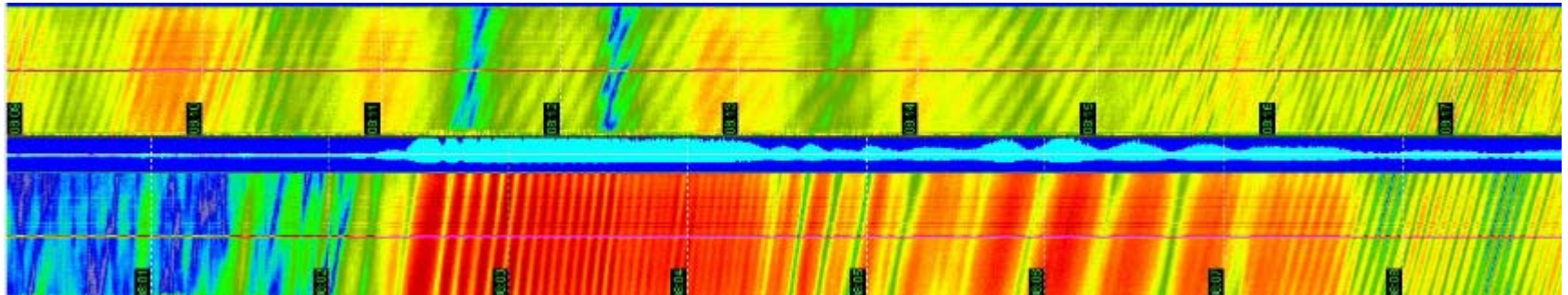
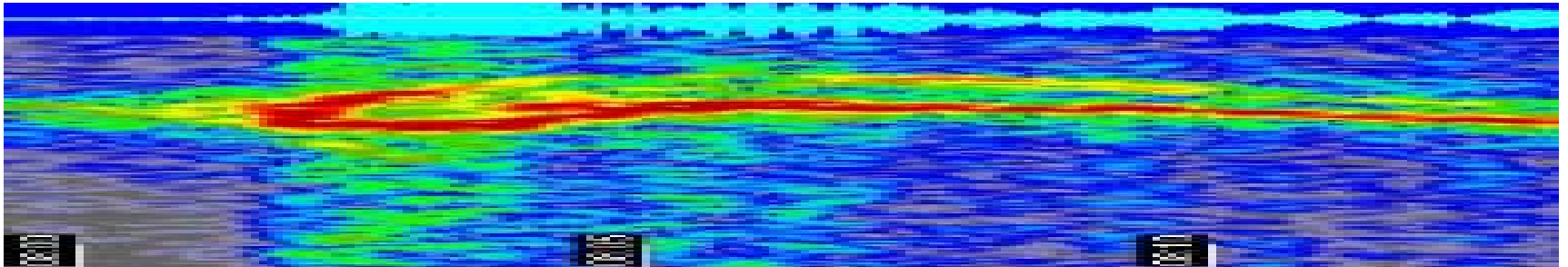
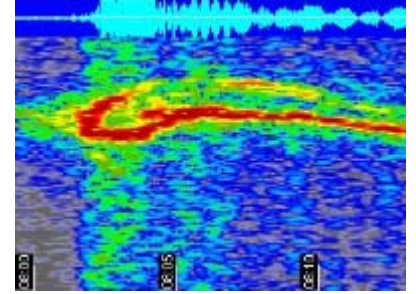
Large bande

- Événement complexe



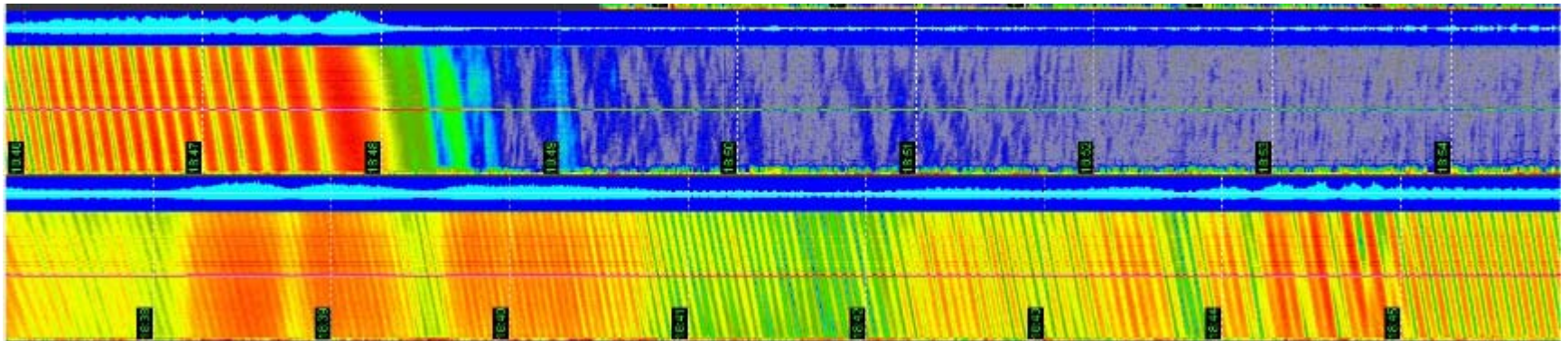
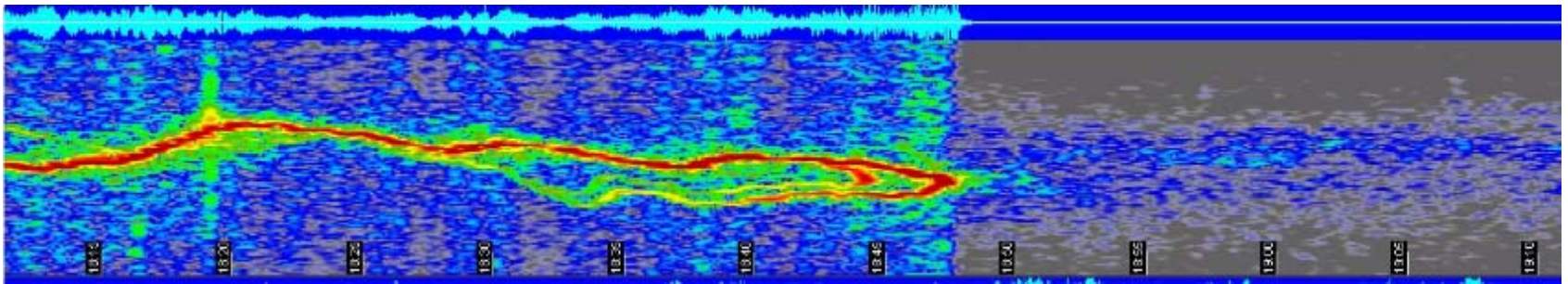
Bande étroite - Large bande

- Crochet d'ouverture



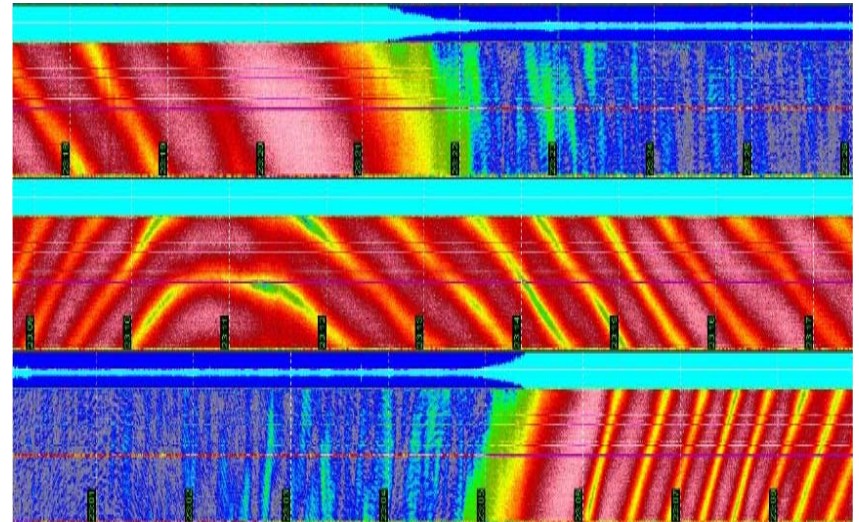
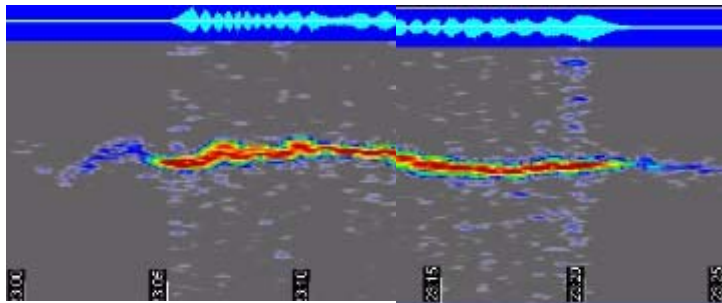
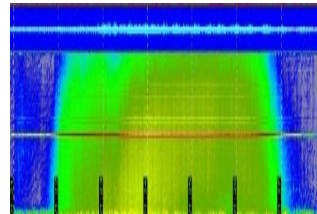
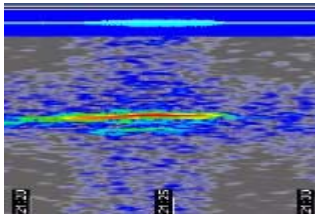
Bande étroite – Large bande

- Crochet de fermeture



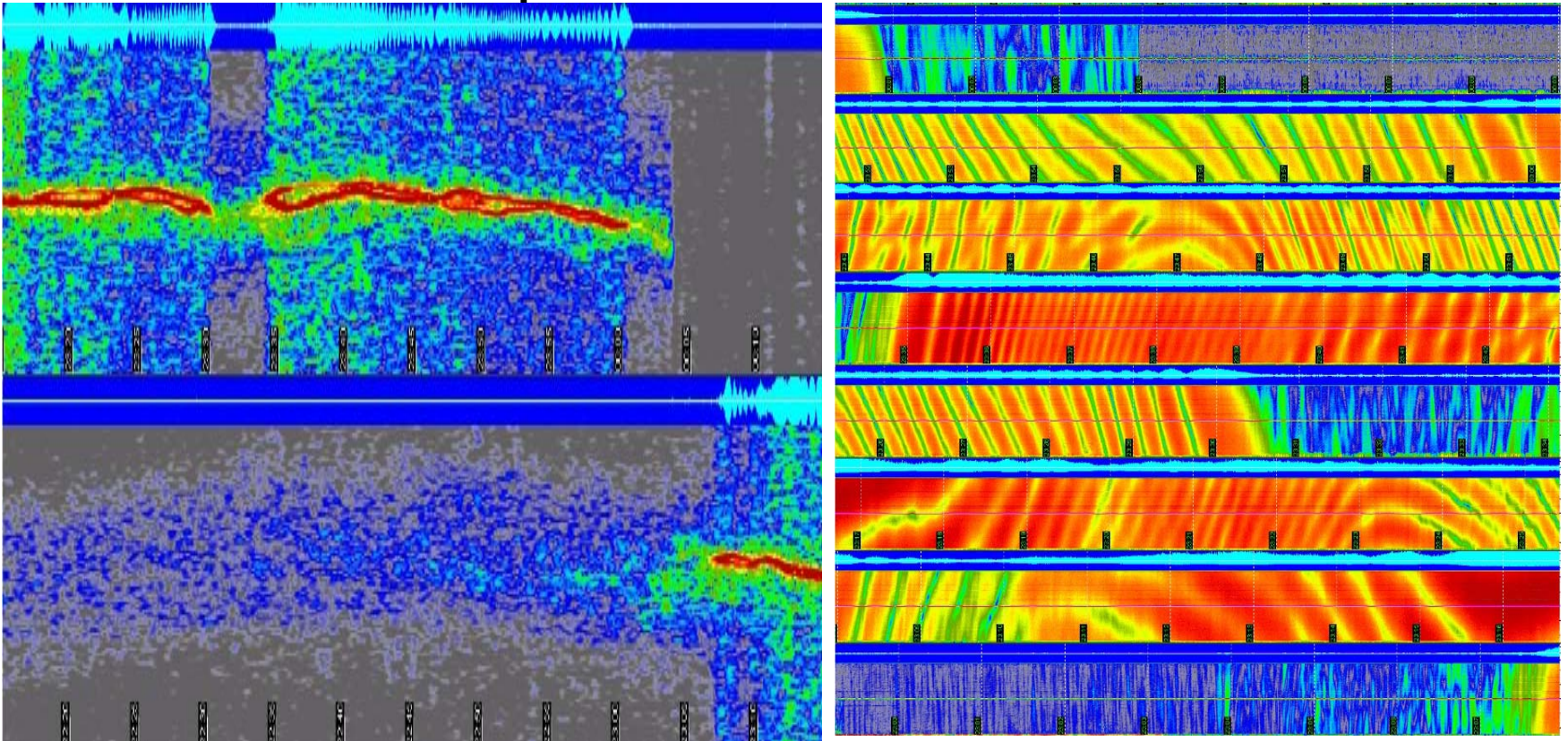
Bande étroite – large bande

- Réflexion sur un nuage de plasma



Bande étroite-large bande

- Evolution sur plus de 1 heure



Conclusion

- L'analyse des variations de fréquence permet:
 - de déterminer les heures d'ouverture de la liaison
 - Les variations des hauteurs de réflexion
 - Les ondes de gravité
 - Le fading sélectif en fréquence (multi trajets)
 - Les perturbations ionosphériques
- Technique connue
- Nouveauté
 - Aspect grand public de l'expérimentation
 - Matériel de type radioamateur
 - Carte son
 - Utilisation de logiciels libres
 - Recyclage de matériel de labo obsolète
 - Utilisation d'un émetteur de radiodiffusion à la place d'une sonde déterministe (aspect opportuniste de l'expérimentation)
- Activités futures
 - Simulation sur Spectrumbab des différents phénomènes
 - Battements à plusieurs fréquences
 - Superposition de signaux dont les fréquences se séparent
 - ...
 - Comparaison des simulations et des phénomènes observés
 - Valorisation dans l'enseignement des radiocoms comme illustration d'un canal de radiocommunication réel très aléatoire.