

# RADIOASTRONOMIE

## Observation de notre galaxie à 21 cm

J-J. MAINTOUX – F1EHN

Juin 2012

Document sous licence CC BY-SA

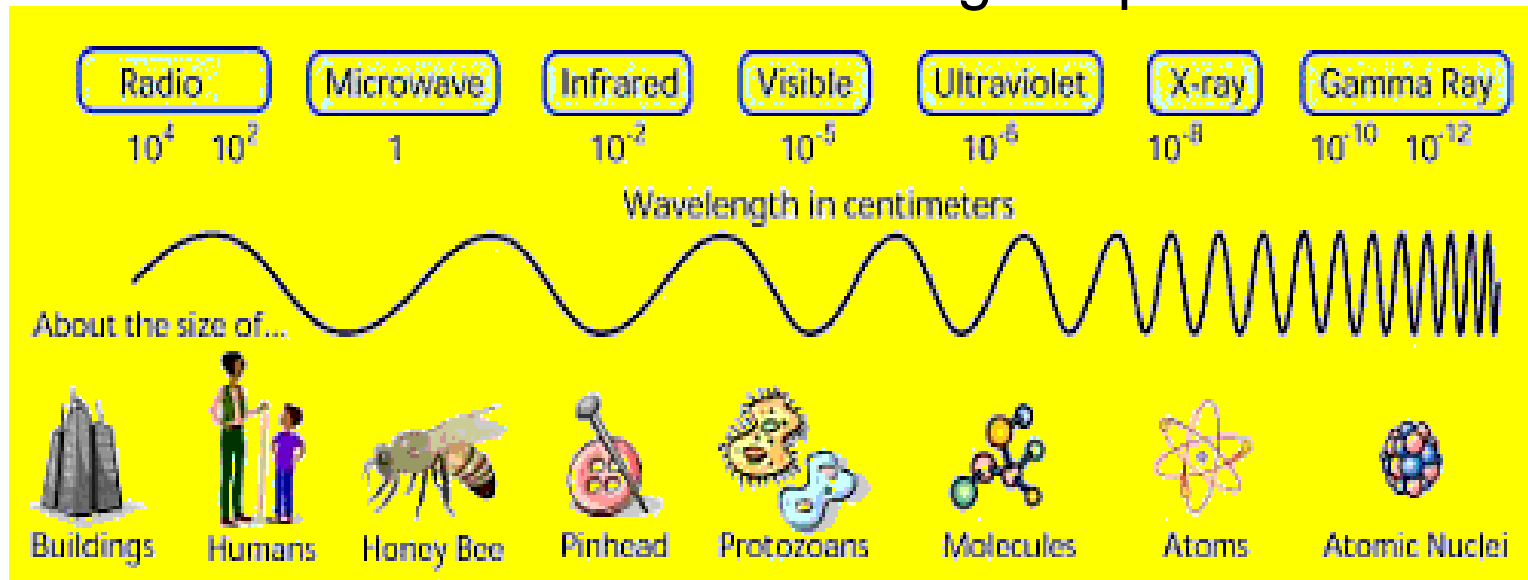


Contact : [jjm\\_f1ehn@wanadoo.fr](mailto:jjm_f1ehn@wanadoo.fr)

# Radioastronomie - Sommaire

- Les ondes électromagnétiques
- Les pionniers de la radioastronomie
- Quelques radiotélescopes modernes
- Principales caractéristiques d'un télescope
- Radioastronomie amateur
- Radioastronomie à 21 cm
  - Station 21 cm
  - Traitements des signaux mis en œuvre
  - L'hydrogène dans notre galaxie
  - Rayonnement H1 à 21 cm
  - Géométrie de la galaxie et effet Doppler-Fizeau
  - Vitesse de rotation dans la galaxie
  - Cartographies radio et 2D des masses d'hydrogène.
  - Bibliographie et sites web utilisés pour cette note

# Les ondes électromagnétiques



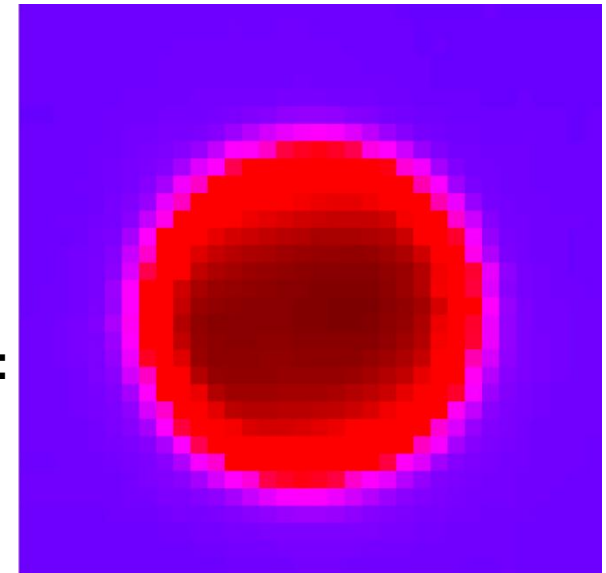
## Ex : La LUNE

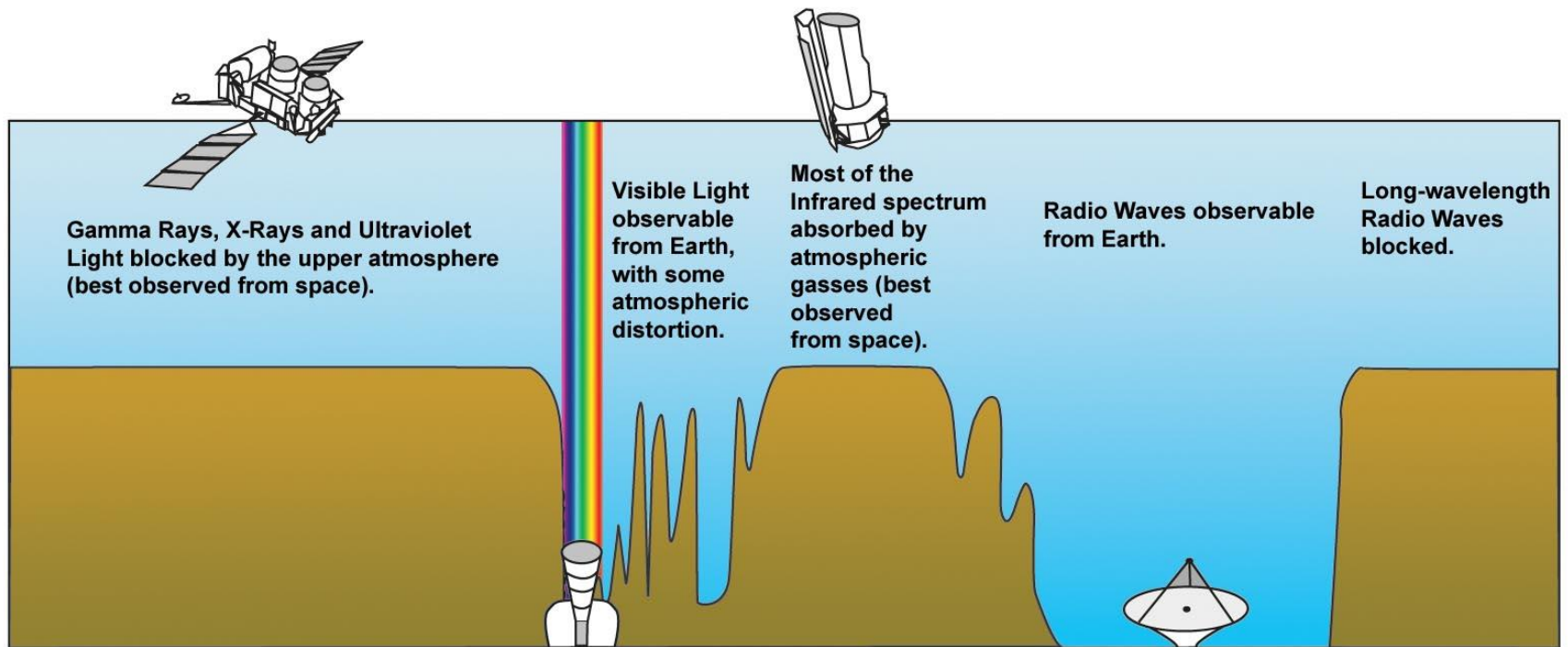
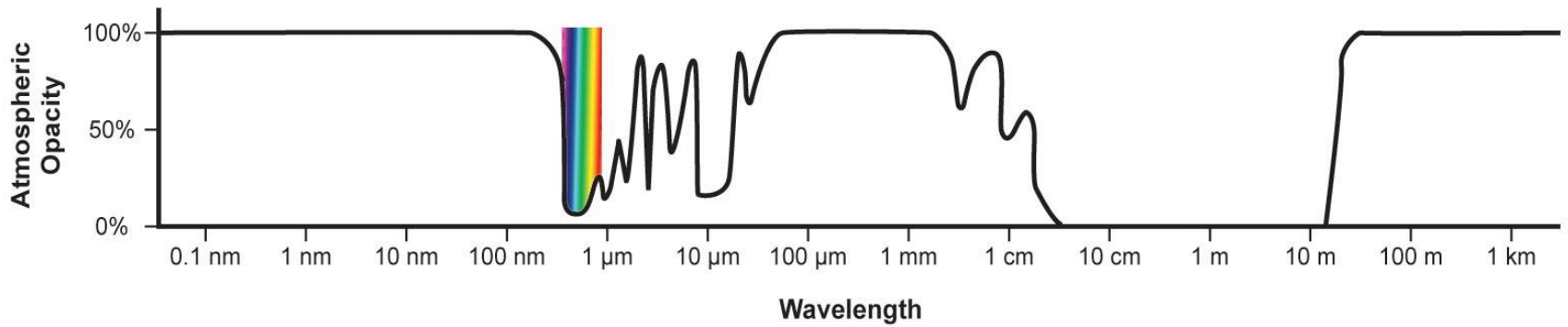
### Longueurs d'onde visible:

Les rayons du soleil sont réfléchis => **Phases lunaires**

### Longueurs d'onde radio:

Corps noir chaud  
rayonnement (200 K)  
=> **Pas de phase lunaire**

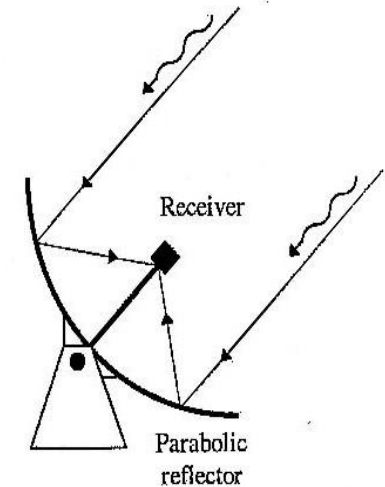




# Quelques caractéristiques d'un radiotélescope

- Sensibilité proportionnelle à  $D^2$

- Résolution proportionnelle à  $\lambda/D$

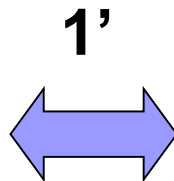


- Avec  $D =$  Diamètre du réflecteur et  $\lambda =$  longueur d'onde

- **En optique : Pupille humaine :**

- $\lambda \sim 10^{-3}$  mm

- $D = 5$  mm

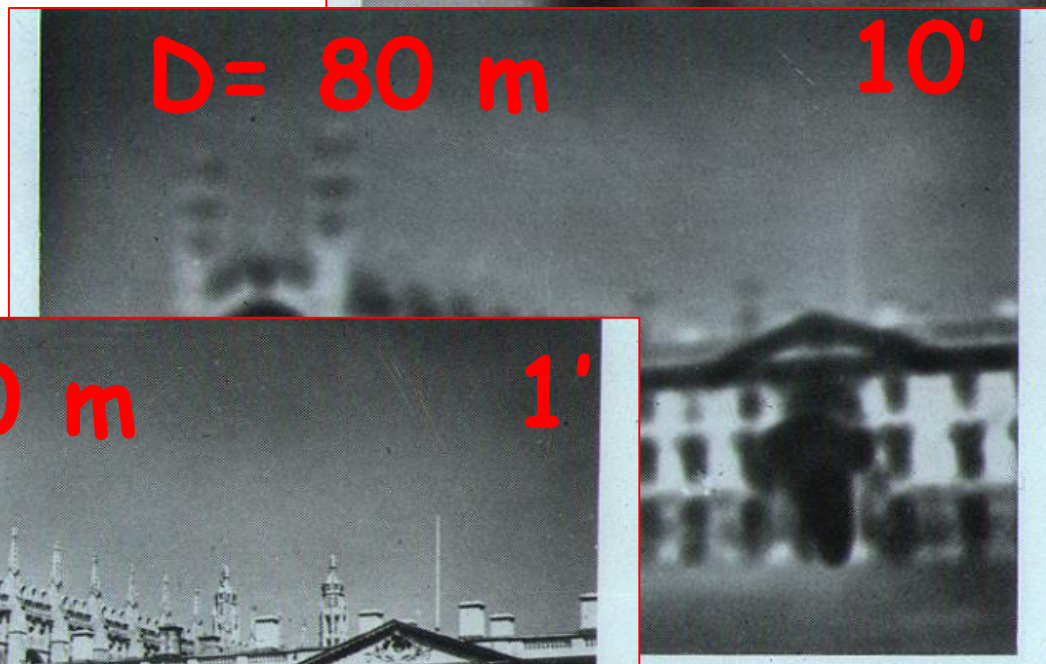
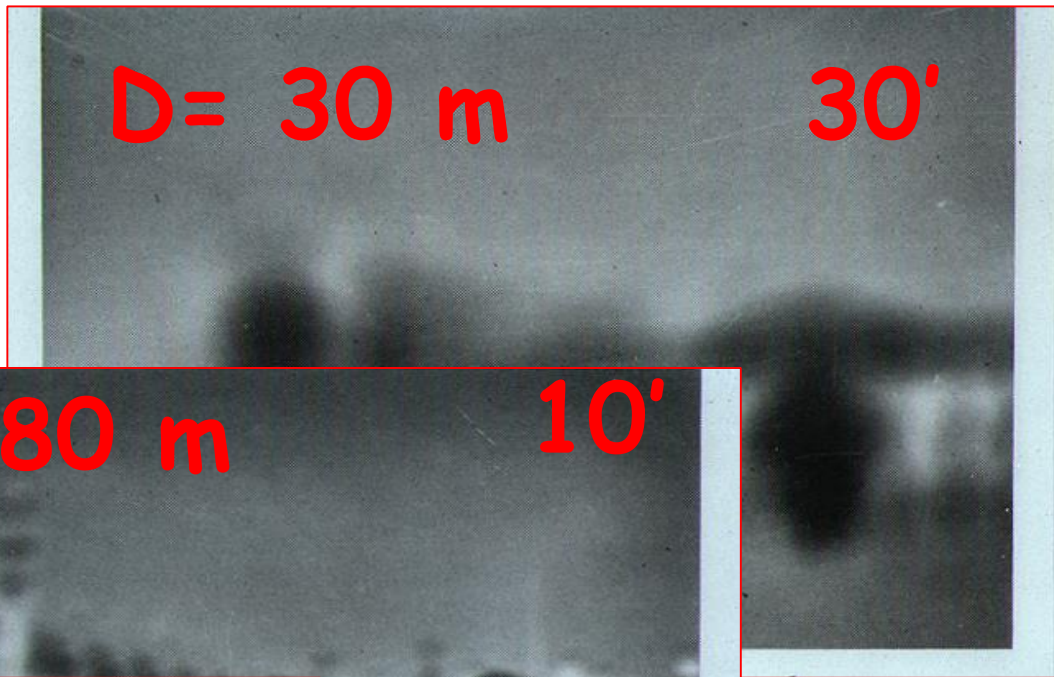


- En radio à 21 cm

$D = 30 \text{ m}$  30'

$D = 80 \text{ m}$  10'

$D = 700 \text{ m}$  1'



# Naissance de la Radioastronomie

- **Karl Guthe Jansky** découvrit en 1932 que notre Galaxie émettait des ondes radio. Le signal le plus intense provenait du centre de la voie lactée, dans la constellation du Sagittaire. La découverte fut rendue publique, notamment dans le **New York Times** du 5 mai 1933.

May 5, 1933

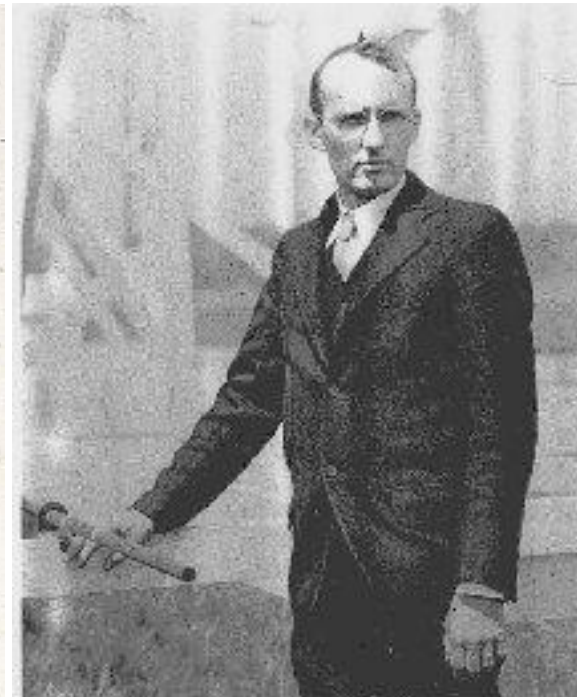


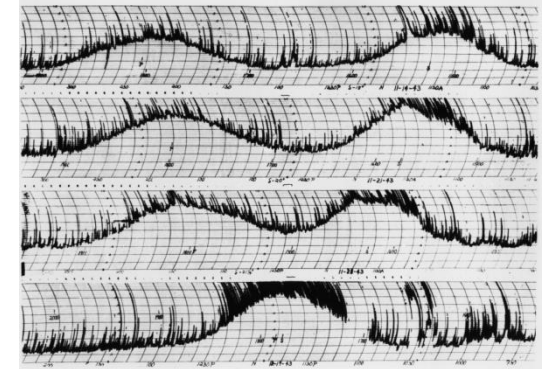
FIG. 1—Karl Guthe Jansky, about 1925.

**Karl Jansky  
(1905 - 1950)**

# Les premiers résultats scientifiques



Grote Reber (1911 – 2002)  
(radioamateur W9GFZ)



Wheaton, IL: 10-m antenna

- 1)detected 160-MHz from Milky Way in 1938
- 2)Discrete sources: Cas A, Cen A

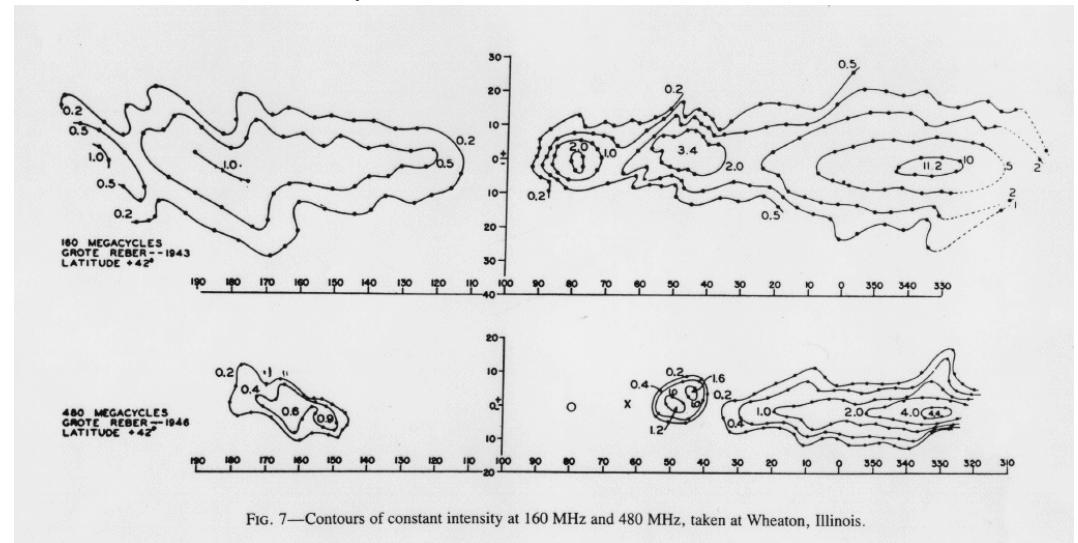
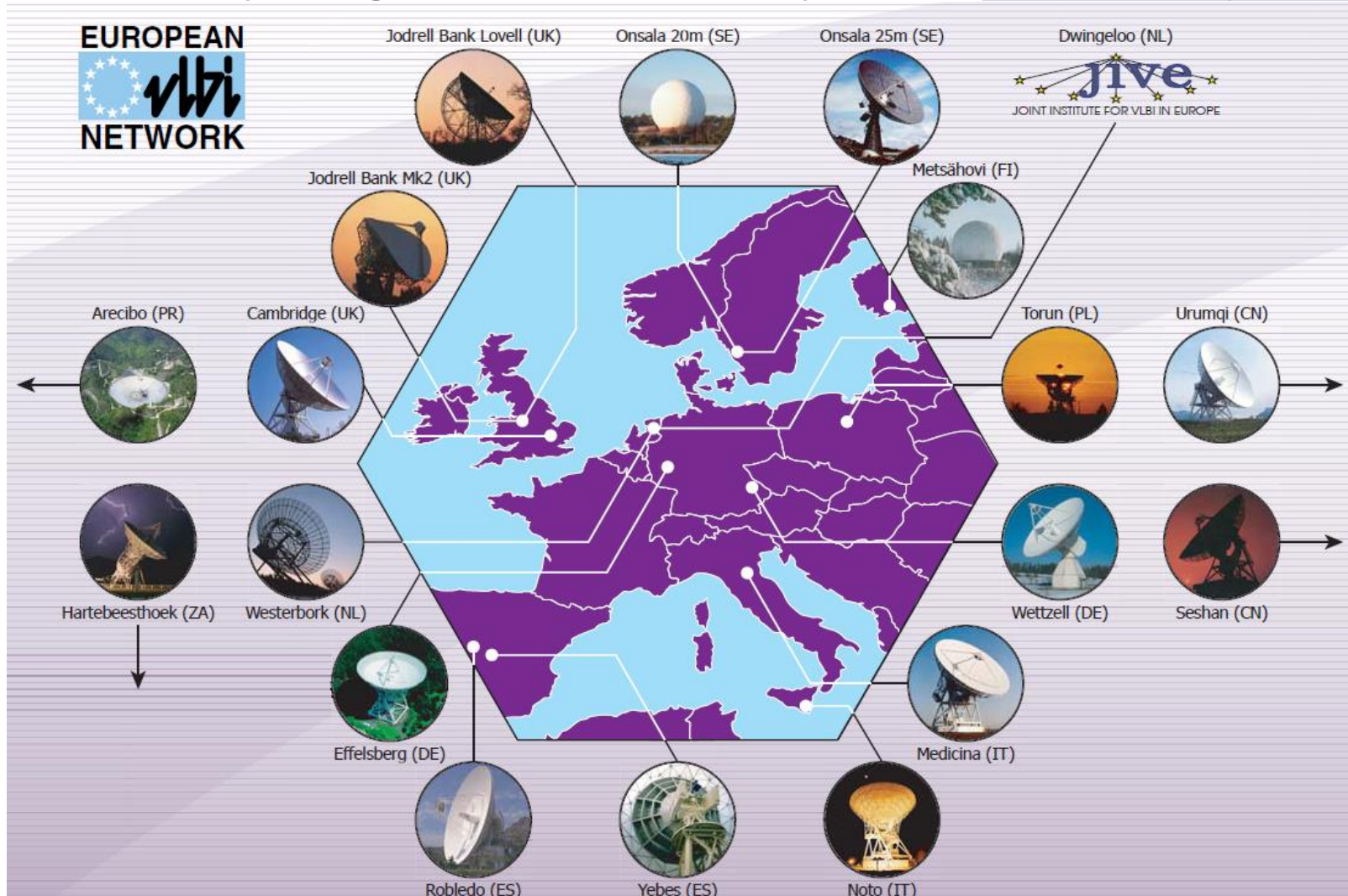


Fig. 7—Contours of constant intensity at 160 MHz and 480 MHz, taken at Wheaton, Illinois.



# Quelques observatoires modernes...

- Le « Very Long Base Interferometry » voir <http://www.jive.nl>



# Quelques observatoires modernes...

- Site de Nancay voir <http://www.obs-nancay.fr>



# La radioastronomie amateur

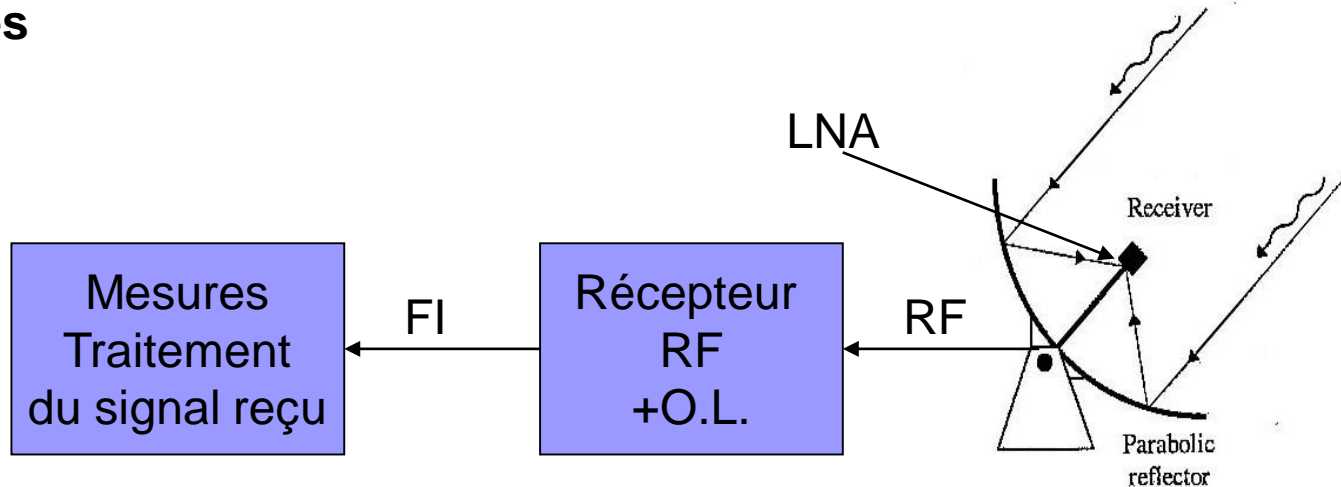
- La radioastronomie amateur est assez peu développée en France. La radioastronomie est l'astronomie des ondes radio. Elle complète naturellement les observations traditionnelles dans le domaine visible.
  - Voir <http://eracnet.org/> ou <http://radio-astronomy.org/>
- Cette note présente les essais effectués en « observant » la raie H1 de l'Hydrogène à 21cm.



Radioastronomie et astronomie – Associations ARRL/F6KSX et AAV

# Station de radioastronomie

- Le schéma synoptique reste identique pour les différentes fréquences reçues



O.L : Oscillateur local utilisé pour la conversion RF/FI =>  $FI = RF - OL$  par ex.

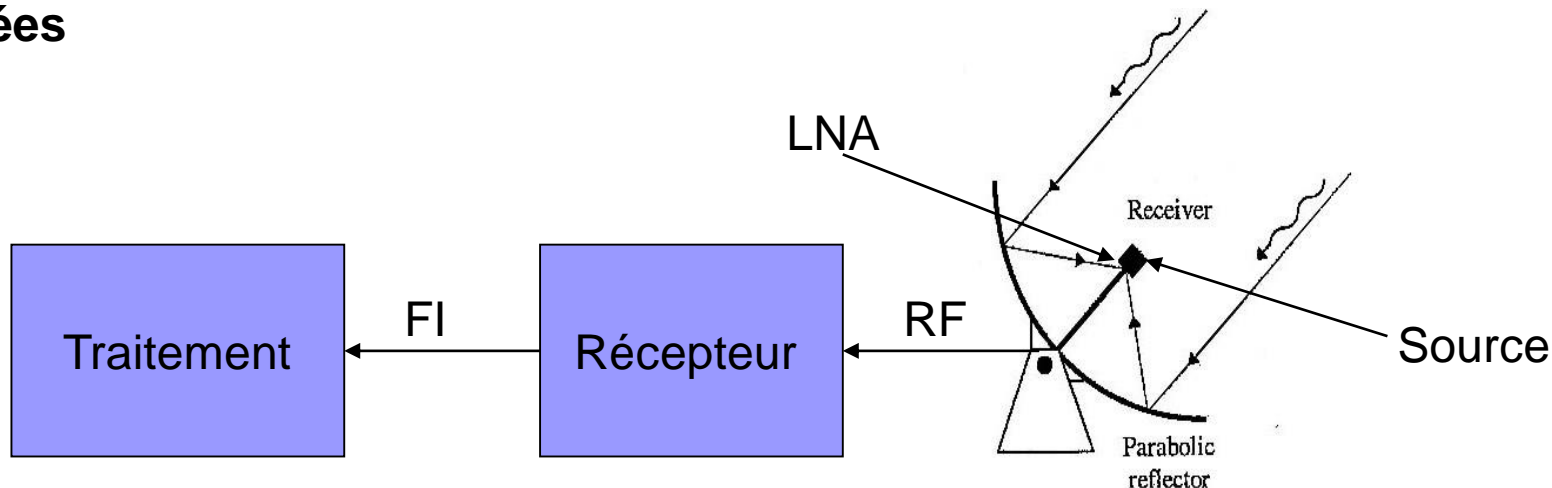
RF : Radio fréquence => correspond à la bande de fréquence utilisée

FI : Fréquence intermédiaire. Cette fréquence plus basse permet de véhiculer les signaux avec une atténuation réduite et autorise un filtrage plus sélectif adapté à la bande d'intérêt et facilite la détection et le traitement. Ces traitements sont difficiles à réaliser directement en RF.

La sensibilité de la station est déterminée par le diamètre de l'antenne (son gain) et sa température de bruit système (ici on néglige les imperfections de l'antenne tels les lobes secondaires par exemple).

# Station de radioastronomie

- Le schéma synoptique reste identique pour les différentes fréquences utilisées



LNA : Amplificateur à faible bruit et gain élevé. Il détermine la température de bruit du système  $T_{sys}$  en degrés Kelvin (K).

$$T_{sys} = T_{ant} + (L_r - 1) * 290K + L_r T_r$$

avec

$L_r$  : pertes liaisons source/LNA ex  $L_r = 1.047$  (0.2dB) en 3cm

$T_r$  : température de bruit du récepteur (LNA si gain suffisant)

ex  $T_r = T_o (nf - 1)$  soit  $T_r = 75K$  (si  $NF = 1dB$ )

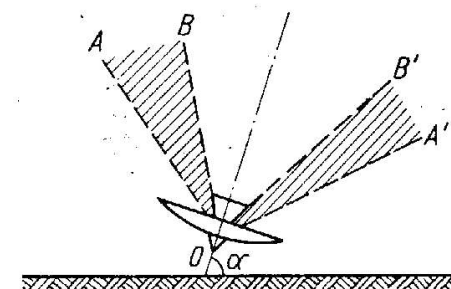
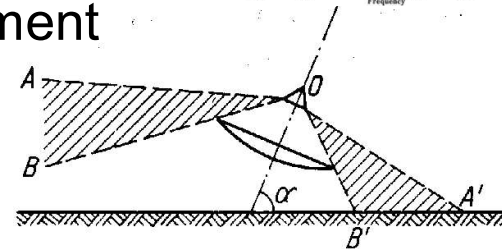
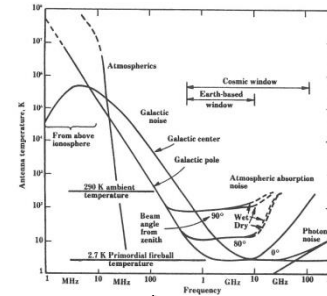
$nf = 10^{(NF/10)}$  et  $T_o = 290 K$

$T_{sys}$  comporte donc 2 parties :

- Une partie fixe dépendant de la conception du récepteur
- Une partie variable (Température d'antenne =  $T_{ant}$ ) dépendant de la direction visée par l'antenne et de ses performances (voir page suivante).

# L'antenne

- L'antenne utilise généralement un réflecteur parabolique. Sa taille est de l'ordre de 1 à qq mètres pour les stations « amateur ».
- La température d'antenne est affectée par :
  - Le fond diffus cosmologique (ou CMB pour Cosmic Microwave Background),
  - La galaxie,
  - L'atmosphère
  - L'environnement (le sol, les bâtiments...)
- La configuration d'antenne influe également
  - Prime focus : le spillover voit le sol
    - =>  $T_a$  plus élevée
  - Cassegrain : le spillover voit le ciel
    - =>  $T_a$  plus faible



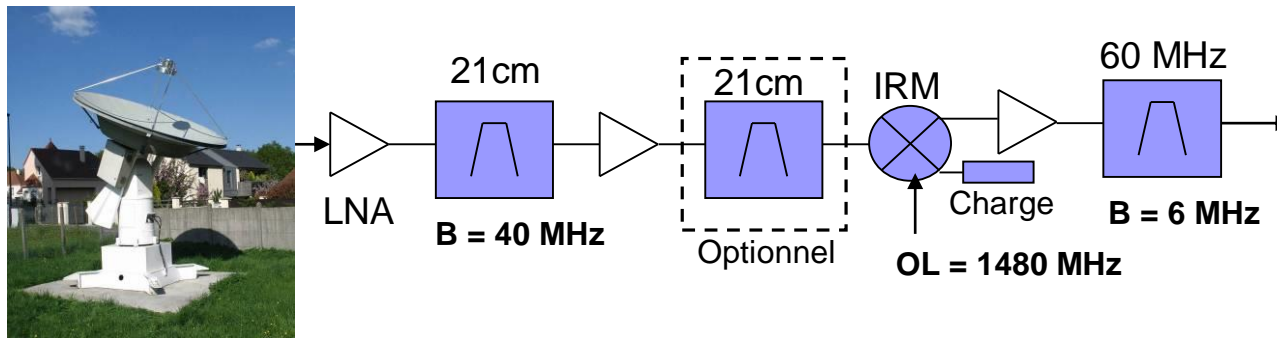
# Traitement des signaux reçus en 21cm

- Synoptique de la station
- Principales caractéristiques
  
- Format des données
- Traitement des données
  - Référence
  - Normalisation
  - Correction Doppler
  - Suppression des signaux parasite
  - Lissage / filtrage
  - Recadrage sur bande utile

# Synoptique de la station

- La station est décrite en détail dans le document de description de la station 21cm (lien en annexe)
- Synoptique

Rec. num.



- Les données sont acquises par le récepteur numérique à la cadence de 80 MHz. Un filtrage numérique réduit la bande de fréquence à 2.5 MHz et le débit de données (décimation) à 2.5 MEch/sec. Chaque échantillon est codé sur 14 bits en entrée et 24 bits en sortie.
- Les données sont stockées dans 1 FIFO (RAM PC) et le logiciel d'acquisition les stocke sur disque dur suivant un format défini.



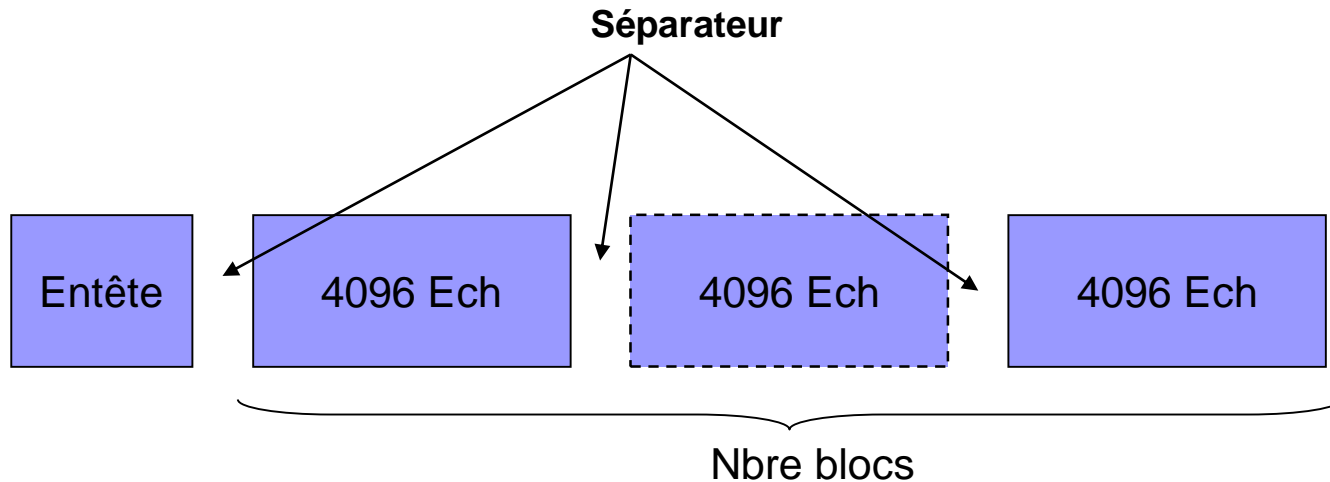
# Principales caractéristiques de la station

- Parabole diamètre 3,3m => HPBW = 4,4°
- Fréquence d'échantillonnage : 2,5 MEch/s
- Bande utile : 2 MHz soit env +/- 200 km/s @ 21cm
- Température Système : =>  $T_{sys} = 60K$
- Bande d'analyse minimale (@FFT 4096 pts) :  $Bw = 610$  Hz
- Résolution vitesse (@FFT 4096 pts) : 128 m/s
- Temps acquisition d'un bloc 4096 pts :  $T_b = 1,6$  ms
- Sensibilité de détection :  $Sd = \frac{T_{sys}}{\sqrt{Bw * T}}$
- Sensibilité nécessaire @ 21cm : 1 K soit un S/B = 20 dB pour un signal de 100K (valeur typique pour notre galaxie).
- Temps d'acquisition nécessaire :  $T = \frac{T_{sys}^2}{Sd^2 * Bw} \Rightarrow T = 6s$
- Nombre de bloc à acquérir :  $Nb = \frac{T}{T_b} \Rightarrow Nb = 3750$

Mesures effectuées avec  $Nb = 4096$  blocs

# Format des données

- Principe d'acquisition
  - pour 1 fichier d'enregistrement

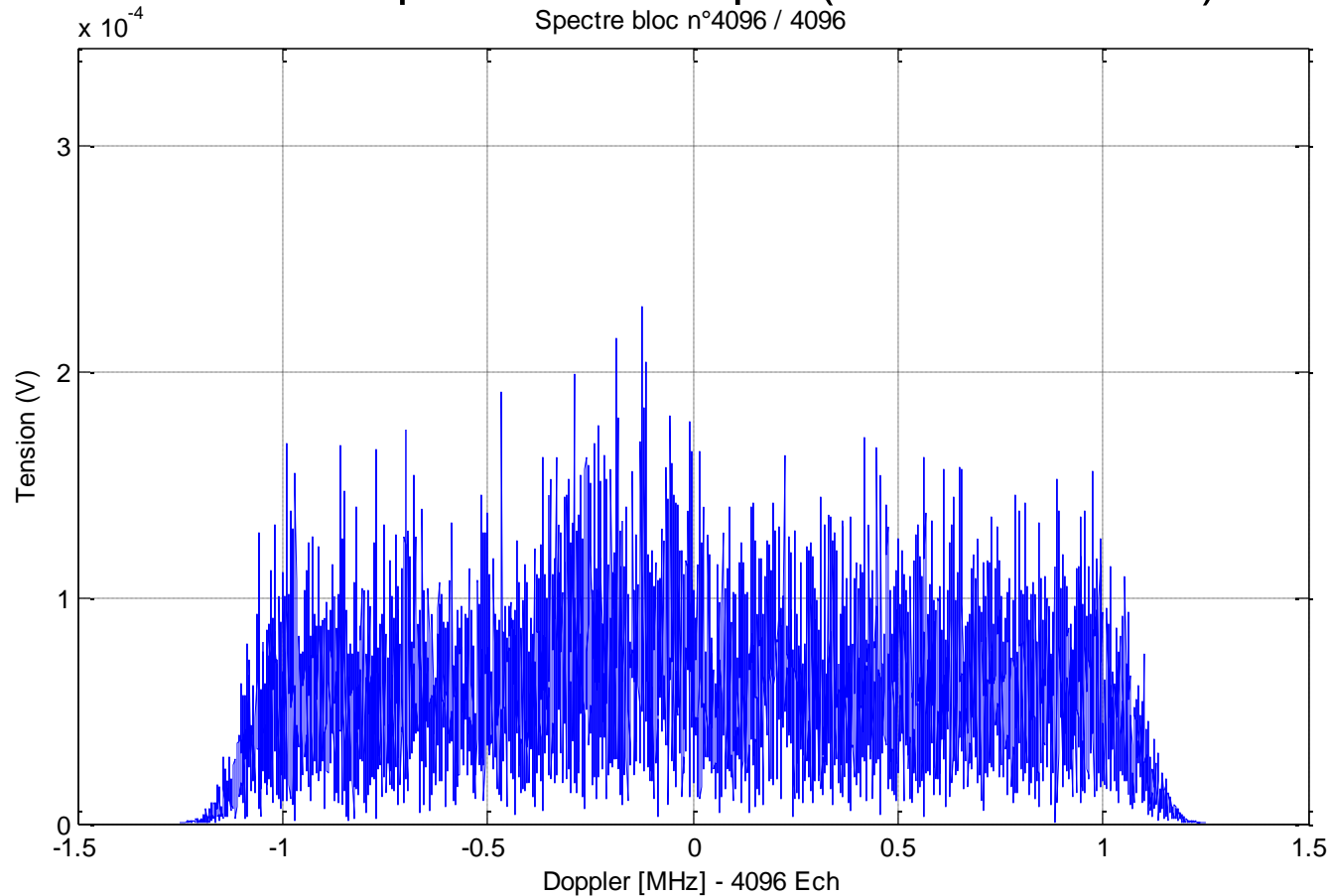


→  
Durée d'enregistrement (fonction du nombre de blocs enregistrés)

Le format détaillé des données est décrit en annexes techniques

# Traitement des données

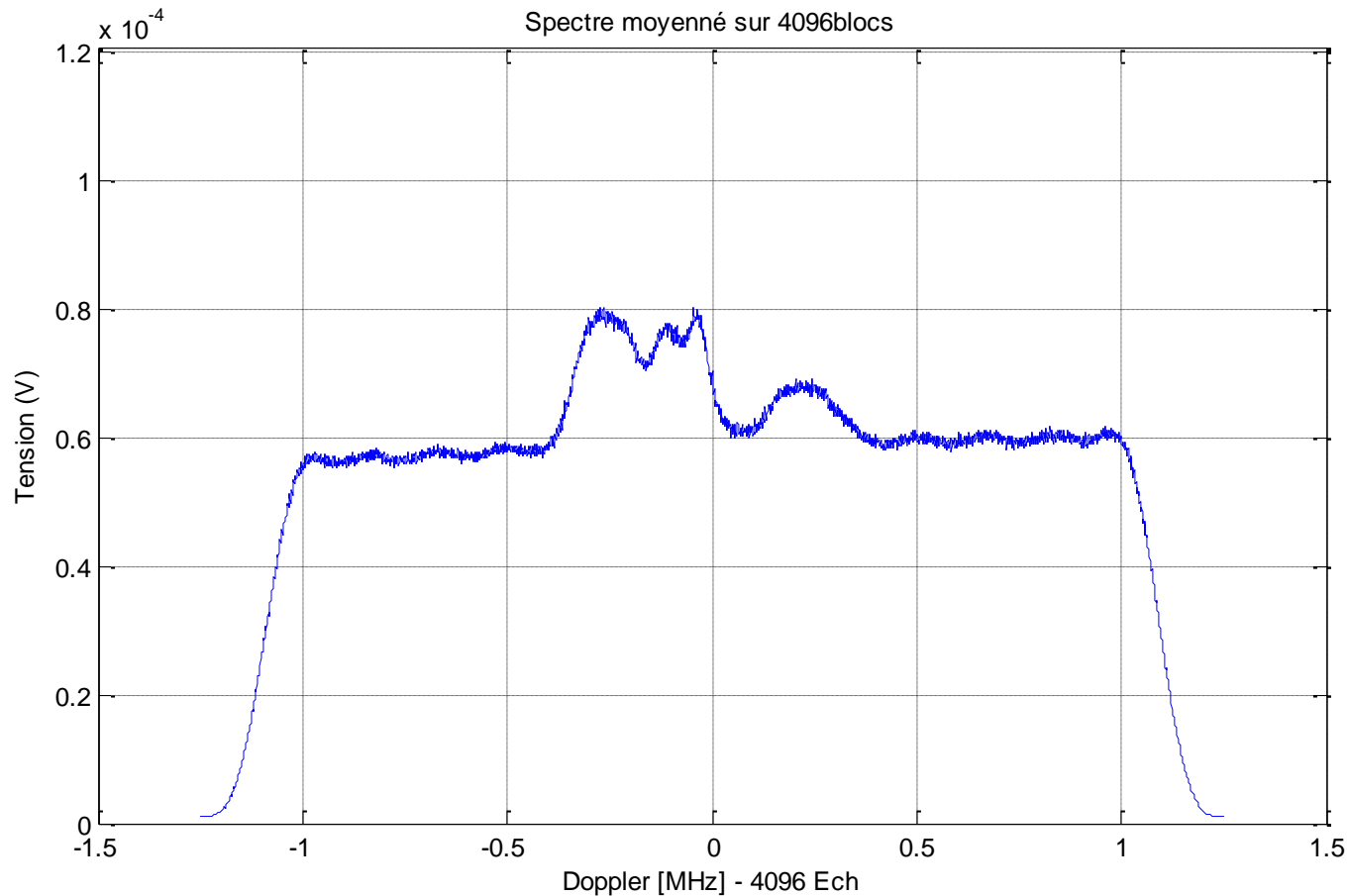
- Lecture entête (voir description ci-dessus)
- Traitement d'un bloc par FFT 4096 pts (données brutes)



Avec 1 seul bloc, aucune détection n'est possible

# Traitement des données

- Traitement de 4096 blocs (4096 \* FFT de 4096 pts)



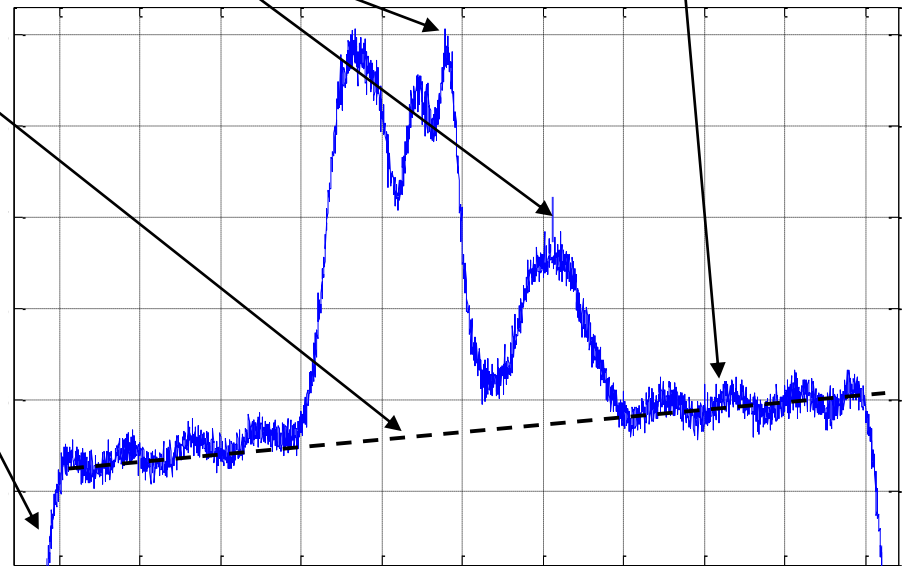
La détection est possible – Imperfections à corriger

# Traitement des données

## ■ Imperfection des données brutes :

- Ondulations liées aux différents filtres analogiques et numériques
- Signaux parasites à bande étroite
- Réponse non plane
- Bande de filtrage

- Correction Doppler

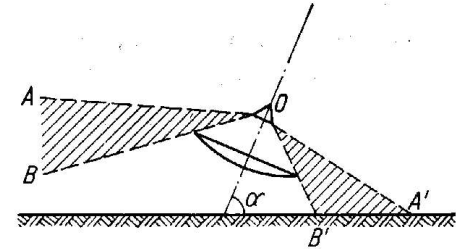


Correction des imperfections => Utiliser une référence

# Traitement des données

- Enregistrement d'une référence :
  - L'hydrogène H1 est présent dans une très grande partie du volume observable

Phénomène de  
Spill over



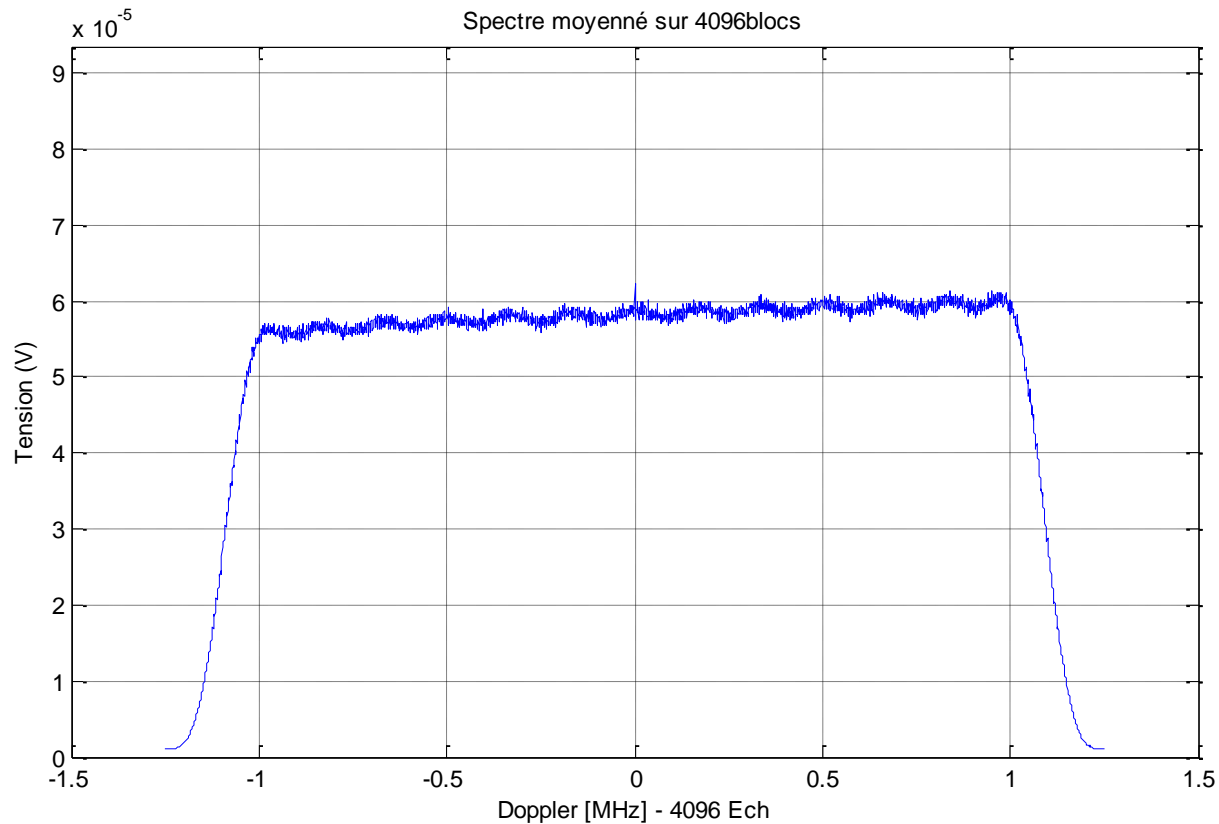
- La température de bruit du système dépend de la position d'antenne (lobes parasites d'antenne, sol, environnement)
- Pour ces 2 raisons majeures, l'offset angulaire (ou scan angulaire) n'est pas utilisable.
- La solution, également utilisée par les radioastronomes, consiste à effectuer un décalage fréquentiel (offset fréquentiel) afin de ne pas recevoir de raie d'hydrogène. Le décalage est minimal afin que le récepteur conserve une réponse identique à celle que l'on veut corriger.

Enregistrement d'une référence par offset fréquentiel =>

# Traitement des données

## ■ Enregistrement d'une référence :

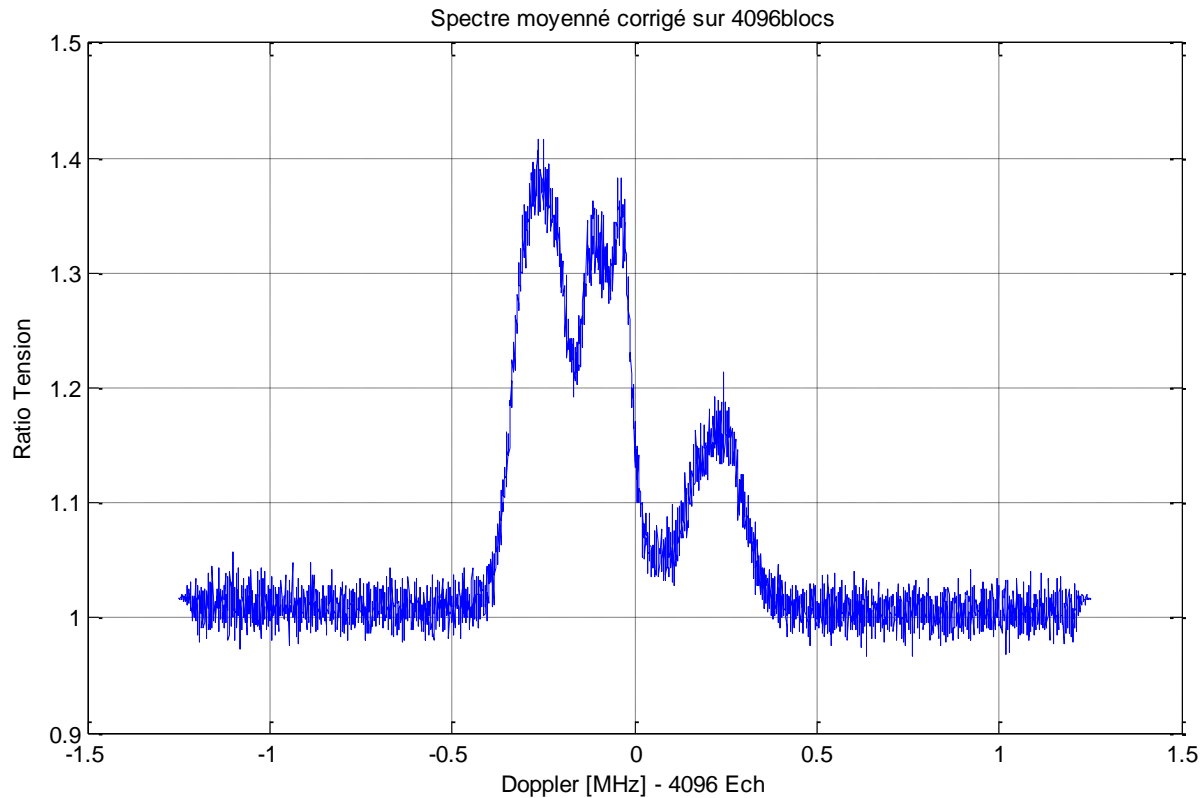
- identique à un fichier de données mais avec un décalage fréquentiel de 2MHz (décalage de l'OL) pour s'affranchir des signaux d'intérêt (H1).



Référence : Un décalage fréquentiel de 2 MHz est utilisé

# Traitement des données

- Utilisation de la référence :
  - La référence présente les mêmes défauts que le fichier de mesure.
  - Un rapport des 2 fichiers (mes./réf.) donne le résultat suivant



La réponse est plane. Il subsiste les signaux parasites.

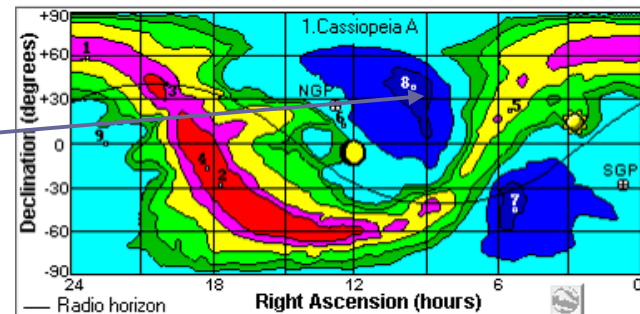


# Traitement des données

## ■ Normalisation :

- Cette étape permet de passer d'une mesure relative (rapport entre 2 mesures) à une mesure absolue de l'augmentation de la température d'antenne. Cette augmentation représente alors le niveau du signal reçu et permettra donc d'en déduire le volume d'hydrogène présent dans l'ouverture angulaire de l'antenne
- La pente du récepteur est déduite de 2 nouvelles mesures, une première sur une région froide du ciel (qq K) et une seconde sur le soleil (zone chaude connue). On obtient alors une indication en K fonction de la température d'antenne.

*\* Le ciel froid CS correspond à la région de la constellation Leo.*



## Relevés du flux solaire pour le 1 Mai 2009

Freq	Learmonth	San Vito	Sag Hill	Penticton	Penticton	Palehua	Penticton
□ MHz	0500 UTC	1200 UTC	1700 UTC	1700 UTC	2000 UTC	2300 UTC	2300 UTC
1415	53	52	54	-1	-1	54	-1

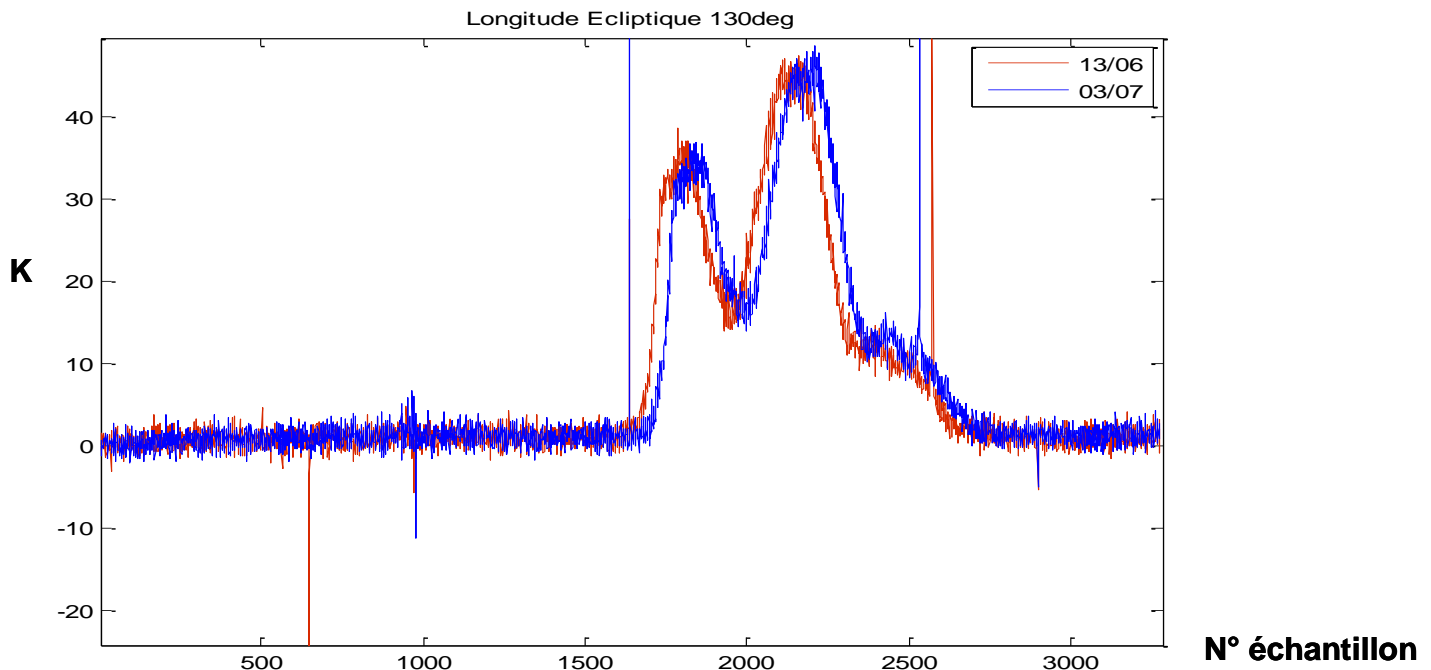
Les calculs de normalisation des données est décrit en annexes techniques

# Traitement des données

## ■ Correction Doppler :

- L'analyse de 2 séries de mesure effectuées à 2 dates différentes montre qu'un décalage Doppler dû à la mécanique céleste\* provoque un écart de mesure sur les spectres relevés

\* (déplacement du soleil dans la galaxie, rotation de la terre autour du soleil, rotation terrestre).



Pour les mesures, la fréquence du récepteur est accordée sur 1420.40575 MHz

# Traitement des données

- Correction Doppler :
  - Différentes composantes affectent les mesures Doppler/Vitesse

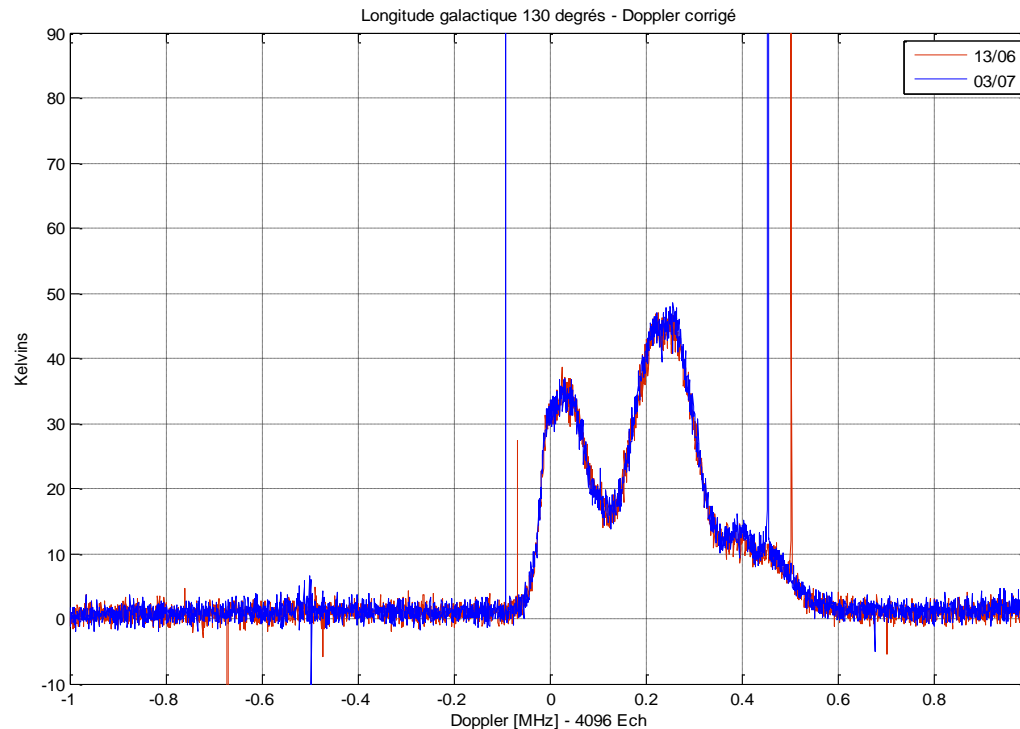
Correct for:	Amplitude ( $\text{km s}^{-1}$ )	Rest frame:
Nothing added	0.0	topocentric
Earth's rotation	$\leq 0.5$	
Earth's motion around earth/moon barycenter	$\leq 0.013 \text{ km s}^{-1}$	geocentric
Earth's motion around the Sun	$\leq 30 \text{ km s}^{-1}$	heliocentric(z)
Solar motion around the Solar System barycenter	$\leq 0.012 \text{ km s}^{-1}$	barycentric
Solar motion	$\sim 20 \text{ km s}^{-1}$	local standard of rest (LSR)
Galactic rotation	$\sim 300 \text{ km s}^{-1}$	galactocentric

Les différentes composantes de vitesse doivent être prise en compte

# Traitement des données

## ■ Correction Doppler :

- VLSR est calculé par le programme de Tracking, La valeur de VLSR est lue dans l'entête du fichier puis appliquée par décalage des spectres des signaux reçus. La résolution est égale à la bande acquise divisée par le nombre d'échantillons soit  $2.5 \text{ MHz} / 4096 \Rightarrow 610 \text{ Hz}$  soit  $128 \text{ m/s}$ .



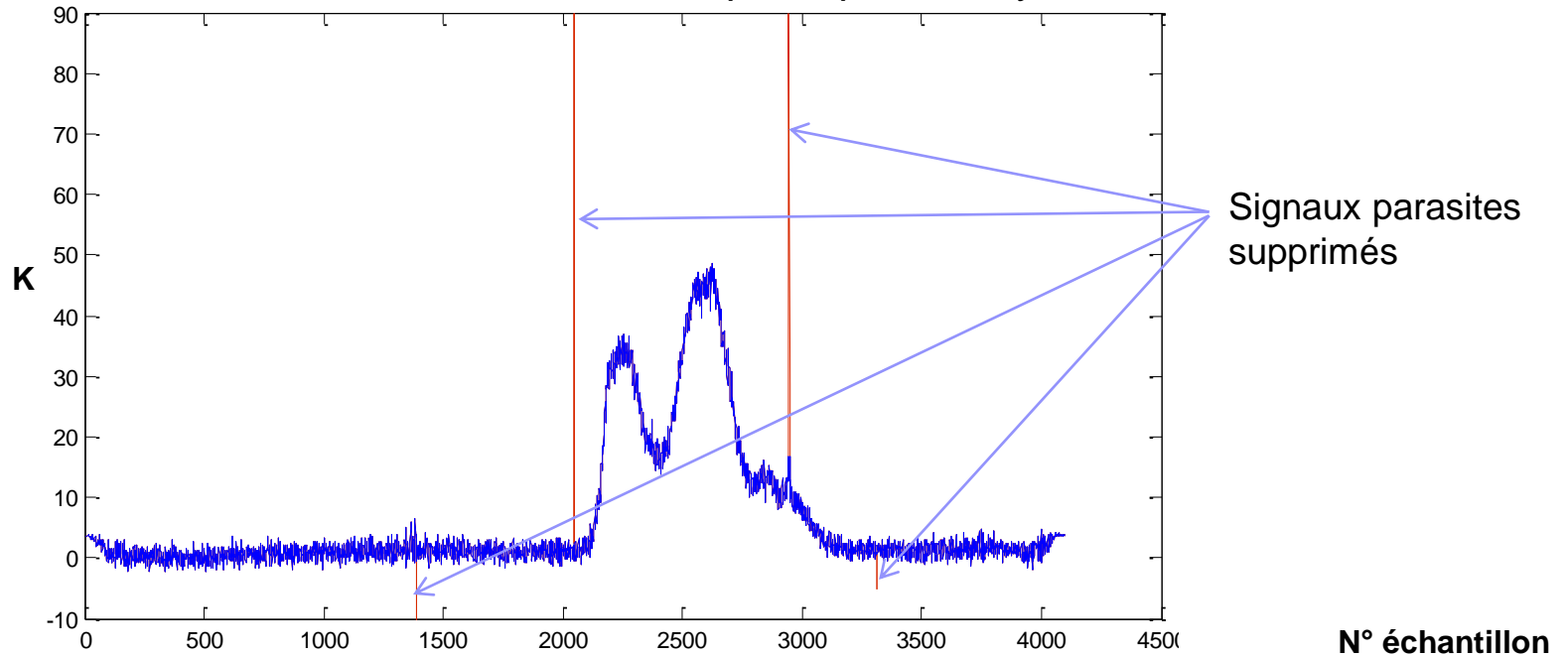
Les 2 mesures sont désormais parfaitement superposées

Le détail des mesures Doppler effectuées est décrit en annexes techniques

# Traitement des données

## ■ Suppression signaux parasites :

- Ces signaux doivent être supprimés car ils empêchent tout traitement de lissage des signaux. De plus, ils peuvent être puissants.
- Une fenêtre glissante sur l'axe fréquence (x) est utilisée. Si le dernier échantillon de la fenêtre est  $>$  à la moyenne des autres échantillons + 1 seuil déterminé, alors cet échantillon est remplacé par la moyenne

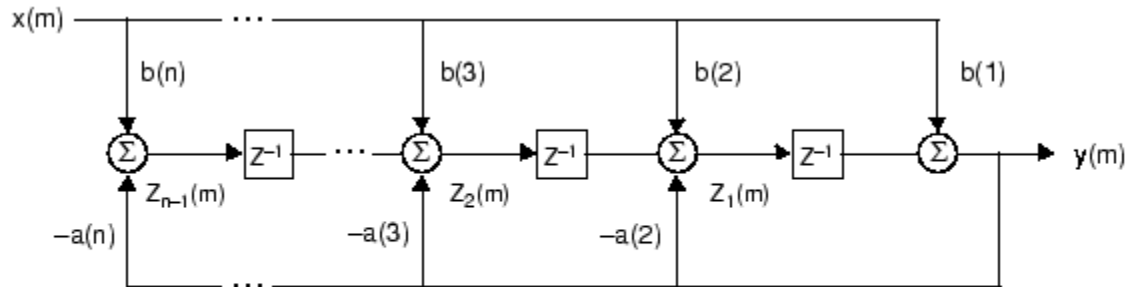


Les signaux parasites sont supprimés sans dégradation => seuil = 10K

# Traitement des données

## ■ Filtrage / lissage des signaux reçus :

- En l'absence de signaux parasites, un filtre numérique peut être appliqué.
- Le nombre d'étages (n) est paramétrable mais n=32 pour une FFT de 4096 points semble bien adapté.
- Le retard (ou latence) apporté par le filtre est compensé par décalage du spectre mesuré (ce décalage est effectué lors de l'opération de correction Doppler)

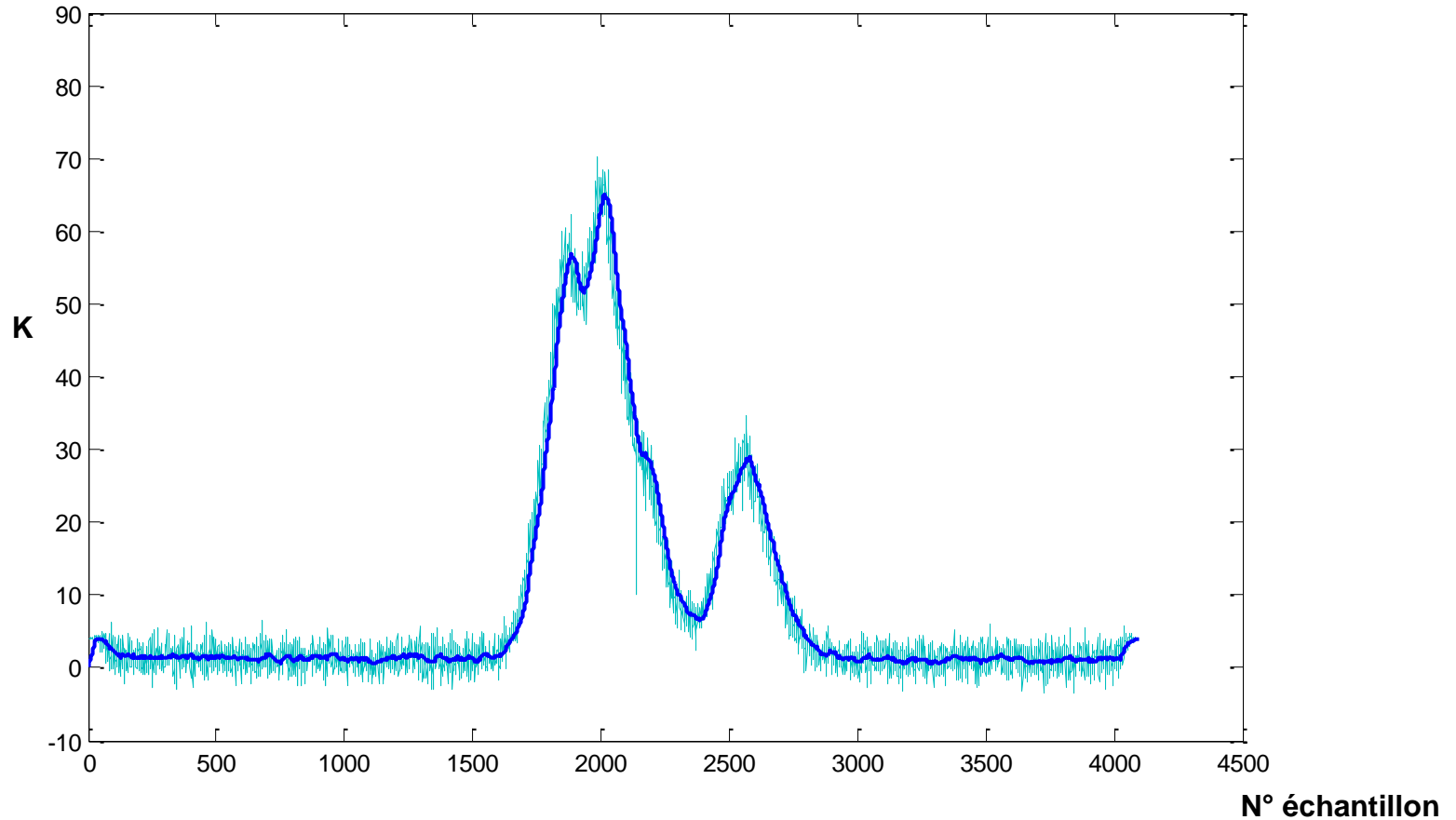


or

$$y(n) = b(1)*x(n) + b(2)*x(n-1) + \dots + b(nb+1)*x(n-nb) \\ - a(2)*y(n-1) - \dots - a(na+1)*y(n-na)$$

# Traitement des données

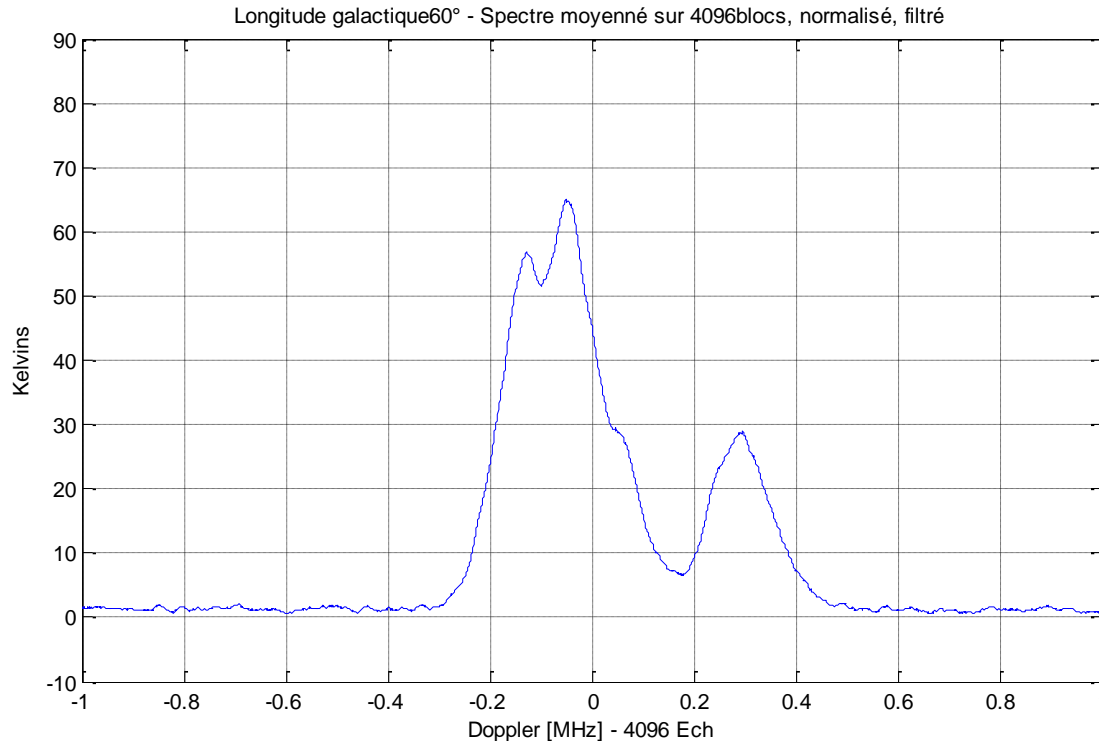
- Filtrage / lissage des signaux reçus (4096 ech) :



Les signaux sont lissés / filtrés

# Traitement des données

- Recadrage sur bande utile :
  - Tous les traitements précédents ont été effectués sur la bande de réception de 2.5 MHz et sur les 4096 échantillons.
  - La présentation finale est faite sur la bande utile par recadrage à 3277 échantillons soit 2 MHz ( $\pm 1$  MHz)

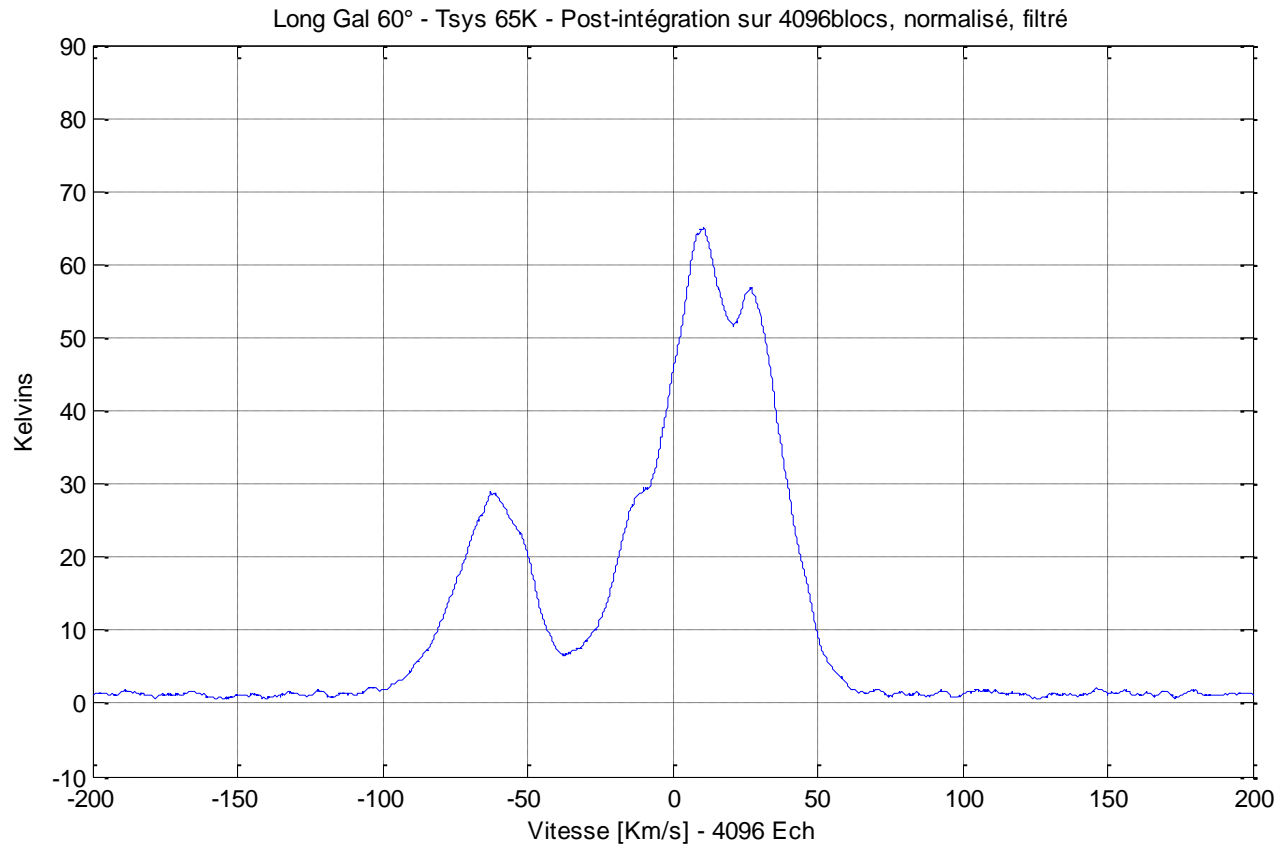


Les mesures sont recadrées sur  $\pm 1$  MHz après traitement



# Traitement des données

- Recadrage sur bande utile :
  - Une présentation en vitesse radiale est faite également en multipliant l'axe fréquence par lambda (21 cm) soit  $V_{\text{radiale}} = -F_{\text{dopp}} * \lambda$



Les mesures sont recadrées sur +/- 200Km/s après traitement

# Observation de notre galaxie à 21cm

- L'Hydrogène atomique neutre dans notre Galaxie
- Notre Galaxie
- Principes de l'observation
  - Géométrie de la galaxie => Principales équations
  - Relevé des différents spectres dans le plan galactique pour les longitudes galactiques visibles depuis l'IDF.
  - En déduire la carte radio (Doppler vs Longitude galactique)
  - Déterminer la vitesse de rotation dans la galaxie  $V(R)$
- But
  - Localiser les masses d'hydrogène dans notre galaxie à partir des mesures de leurs vitesses radiales.
  - Tracer la carte 2 D (X/Y) de notre galaxie

# Observation de notre galaxie à 21cm

De 5 à 10% de la masse totale de notre Galaxie se présente sous forme d'hydrogène atomique présent dans le milieu interstellaire.

L'étude de ce milieu, froid, est possible par l'observation de la raie à 21 cm.



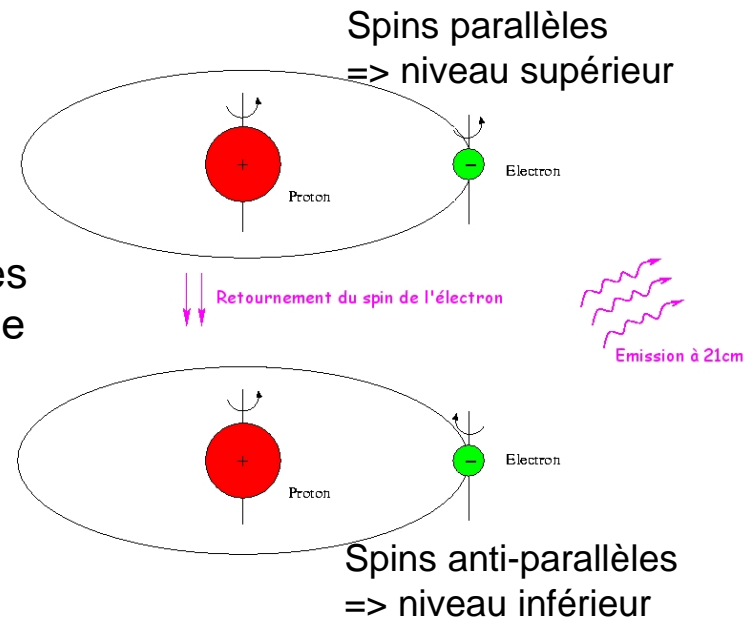
**Vue d'artiste de la Voie Lactée** (Credit & Copyright: Mark Garlick, Space-Art. Astronomy Picture of the Day on 2005 Jan 4).

# Raie de l'Hydrogène atomique (HI ou H1)

## ■ Prédiction théorique: H.C. van de Hulst (1944)

Quand l'électron passe du niveau supérieur (spins parallèles) au niveau inférieur (spins anti-parallèles), il émet un photon à la longueur d'onde de 21 cm qui correspond à la différence d'énergie entre ces 2 niveaux.

Cette transition atomique entre ces 2 niveaux a une très faible probabilité de se produire : un atome d'hydrogène où l'électron est dans le niveau supérieur mettra plusieurs millions d'années à tomber spontanément au niveau inférieur. Malgré cela, le nombre d'atomes d'hydrogène dans l'univers, et en particulier dans le milieu interstellaire est tel que cette transition est souvent observée, et que la raie a une forte intensité. De plus, les collisions entre atomes d'hydrogène favorisent cette transition. De la même manière, la probabilité de collision est extrêmement faible, mais le nombre d'atomes présents est suffisamment grand pour qu'au total, le nombre de transitions soit non négligeable.

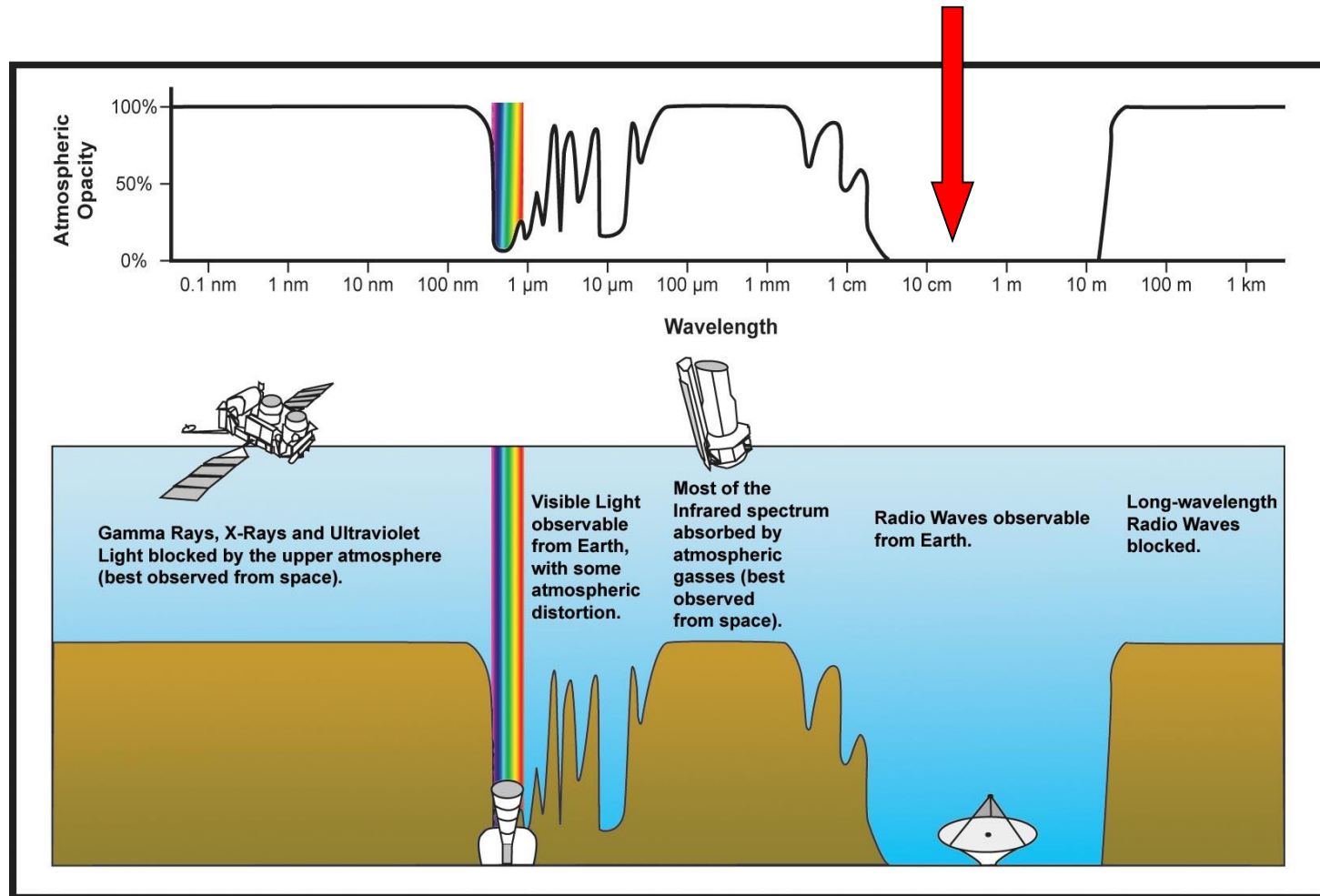


## Découverte observationnelle en 1951

- Ewen & Purcell - USA
- Muller & Oort - Hollande

# Raie de l'Hydrogène atomique (HI ou H1)

Rayonnement émis à **1420.406 MHz** soit **21cm** de longueur d'onde.  
Parfaitement dans la fenêtre radio « observable » depuis la terre.

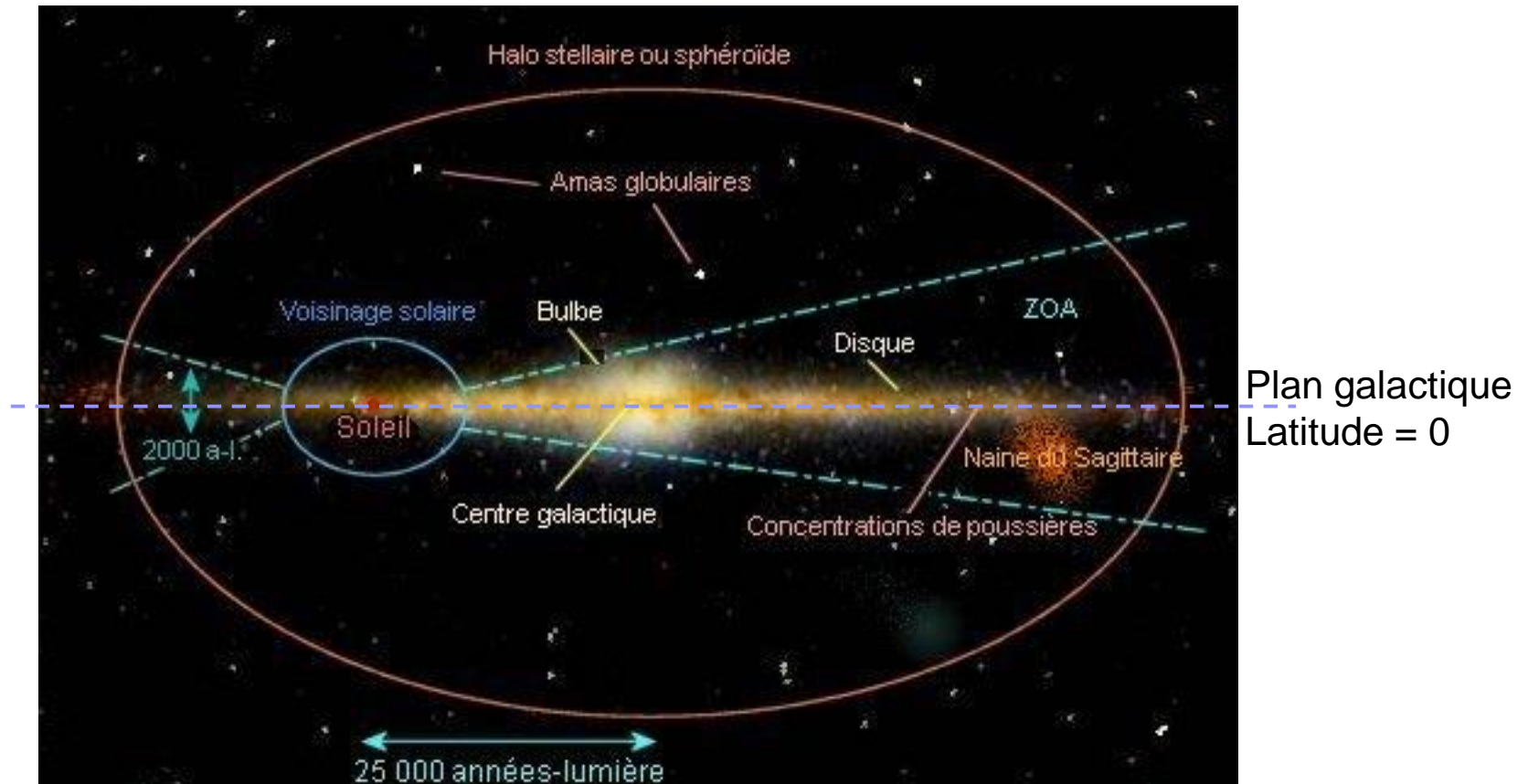


# Observation de notre galaxie à 21cm

- L'Hydrogène atomique neutre dans notre Galaxie
- Notre Galaxie
- Principes de l'observation
  - Géométrie de la galaxie => Principales équations
  - Relevé des différents spectres dans le plan galactique pour les longitudes galactiques visibles depuis l'IDF.
  - En déduire la carte radio (Doppler vs Longitude galactique)
  - Déterminer la vitesse de rotation dans la galaxie  $V(R)$
- But
  - Localiser les masses d'hydrogène dans notre galaxie à partir des mesures de leurs vitesses radiales.
  - Tracer la carte 2 D (X/Y) de notre galaxie

# Observation de notre galaxie à 21cm

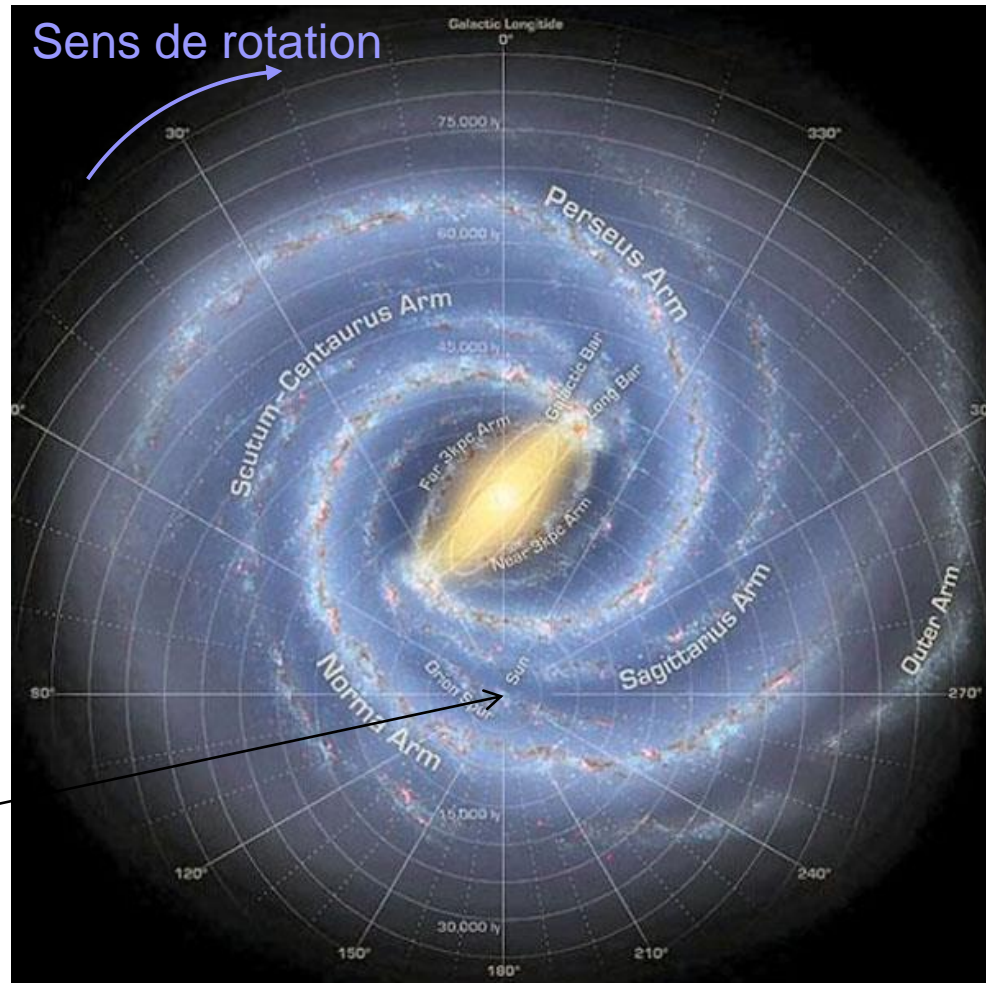
- Dans le plan galactique.



# Observation de notre galaxie – Repères

$l$  = Longitude galactique

Sens de rotation



$l=90^\circ$

$l=270^\circ$

$l=180^\circ$

- Notre position dans la galaxie

130 000 années lumière soit env 40 kpc



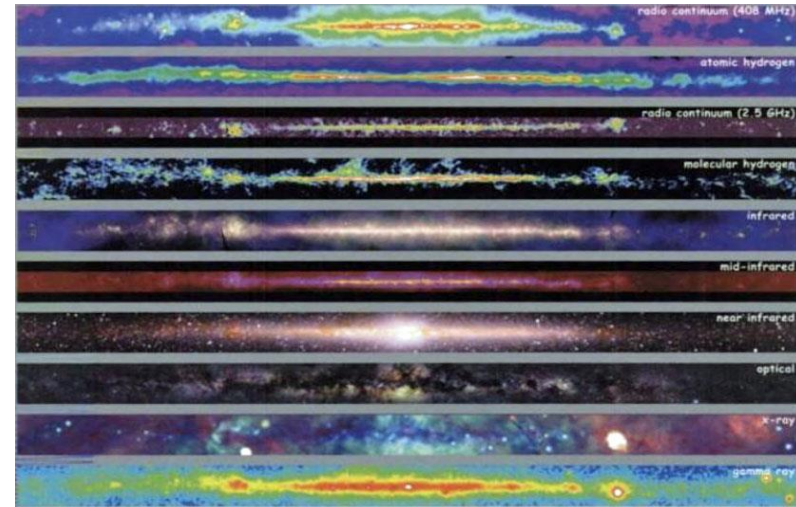
# Observation de notre galaxie à 21cm

## ■ Rayonnement

- La galaxie rayonne dans tout le spectre électromagnétique (rayonnement discret ou continu)

## ■ A 21cm

- Les émissions radio de l'hydrogène sont quasiment observables dans toute notre galaxie.
- En observant les émissions radio de l'hydrogène (raies discrètes), nous pouvons également en apprendre sur le mouvement des nuages du gaz hydrogène dans notre Galaxie. En effet, il est possible de relier la fréquence observée du signal à la vitesse de déplacement du gaz émetteur, grâce à ce que l'on appelle l'effet Doppler-Fizeau.



**Le récepteur doit donc comporter un spectromètre capable de restituer une mesure précise du décalage Doppler.**

# Observation de notre galaxie à 21cm

## ■ Effet Doppler

- A cause de la rotation de notre Galaxie, à chaque direction d'observation correspond une région de HI possédant une vitesse relative particulière (vue du système solaire).
- Par conséquent, l'émission de HI à la fréquence de 1420,406 MHz subit un décalage Doppler fonction de la vitesse relative du gaz HI observé.
- Cette émission produit un spectre en émission différent en fonction des zones observées dans la Galaxie.

$$\lambda = c / f_0$$

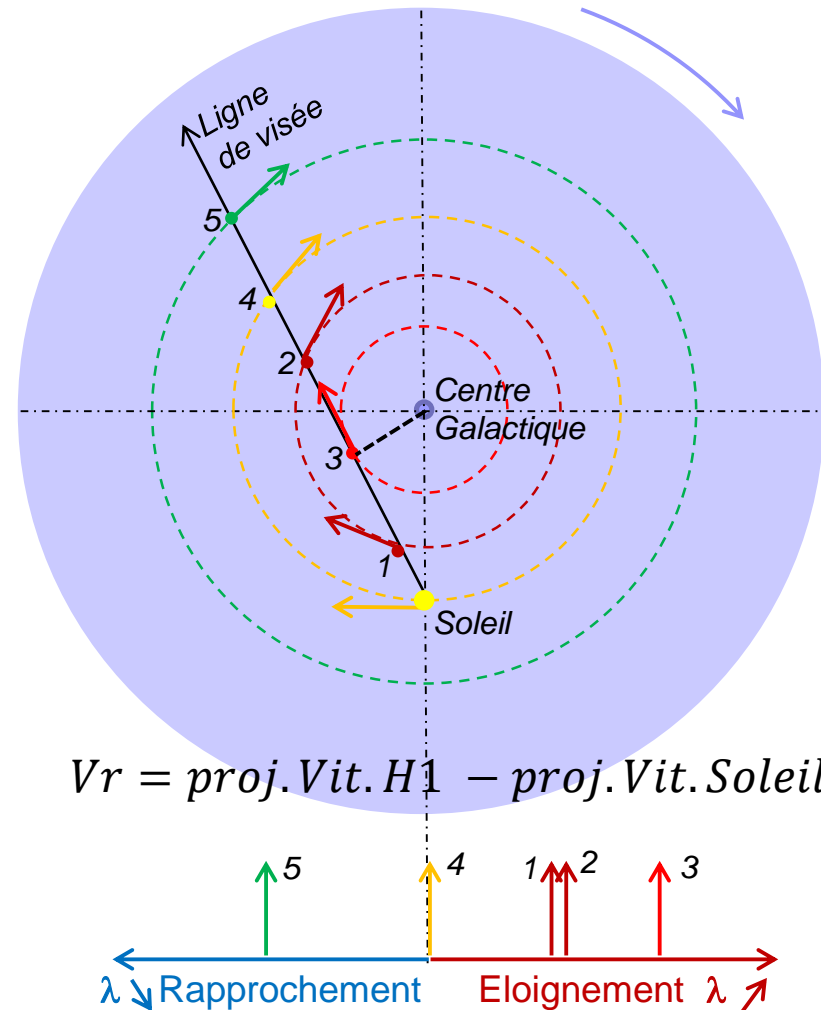
$$c = \lambda \cdot f_0 \Rightarrow \Delta f = -v / \lambda$$

$\Delta f = f - f_0 \Rightarrow$  décalage de fréquence

$f_0$  est la fréquence de la source

$f$  est la fréquence de la raie que nous observons

$v$  est la vitesse,  $>0$  si l'objet s'éloigne,  $<0$  si l'objet se rapproche.



# Observation de notre galaxie à 21cm

- L'Hydrogène atomique neutre dans notre Galaxie
- Notre Galaxie
- Principes de l'observation
  - Géométrie de la galaxie => Principales équations
  - Relevé des différents spectres dans le plan galactique pour les longitudes galactiques visibles depuis l'IDF.
  - En déduire la carte radio (Doppler vs Longitude galactique)
  - Déterminer la vitesse de rotation dans la galaxie  $V(R)$
- But
  - Localiser les masses d'hydrogène dans notre galaxie à partir des mesures de leurs vitesses radiales.
  - Tracer la carte 2 D (X/Y) de notre galaxie

# Observation de notre galaxie à 21cm

## ■ Géométrie de la galaxie

$R_o = \text{dist Soleil au Centre Galactique} = 8,5 \text{ kpc}$

$V_o = \text{vitesse du soleil} = 220 \text{ km/s}$

$l = \text{longitude galactique}$

$S = \text{position du soleil}$

$M = \text{Position du nuage de gaz}$

$T = \text{point tangentiel}$

$V_r = \text{vitesse radiale (sur l'axe de visée)}$

$V_r = \text{proj. Vit. } M - \text{proj. Vit. Soleil}$

$V_r = V * \cos(\alpha) - V_o * \sin(c)$

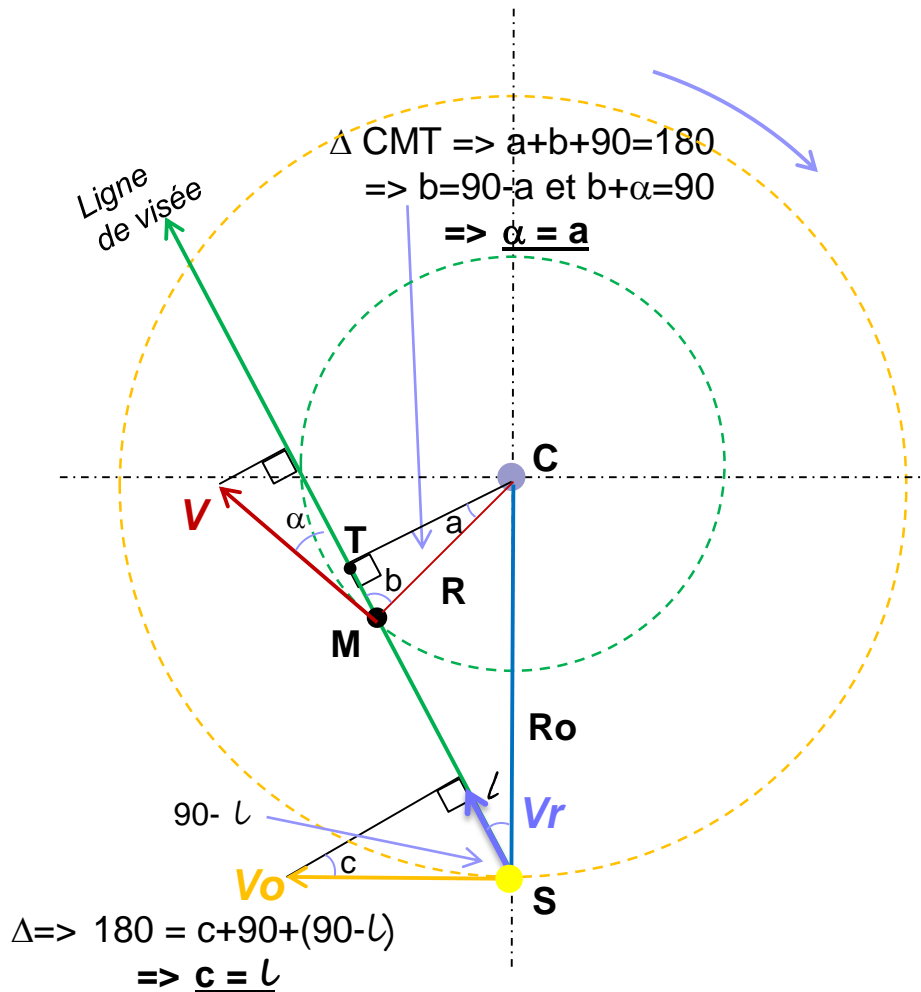
$V_r = V * \cos(\alpha) - V_o * \sin(l)$

Ecrivons  $CT = R_o * \sin(l) = R * \cos(\alpha)$

soit  $\cos(\alpha) = \frac{R_o}{R} * \sin(l)$

$$\text{Eq1} \Rightarrow V_r = V * \frac{R_o}{R} * \sin(l) - V_o * \sin(l)$$

$V_r$ , la mesure, est exprimée en fonction de  $V$  et de  $R$ , les autres valeurs sont connues.



# Observation de notre galaxie à 21cm

## ■ Rotation de la galaxie

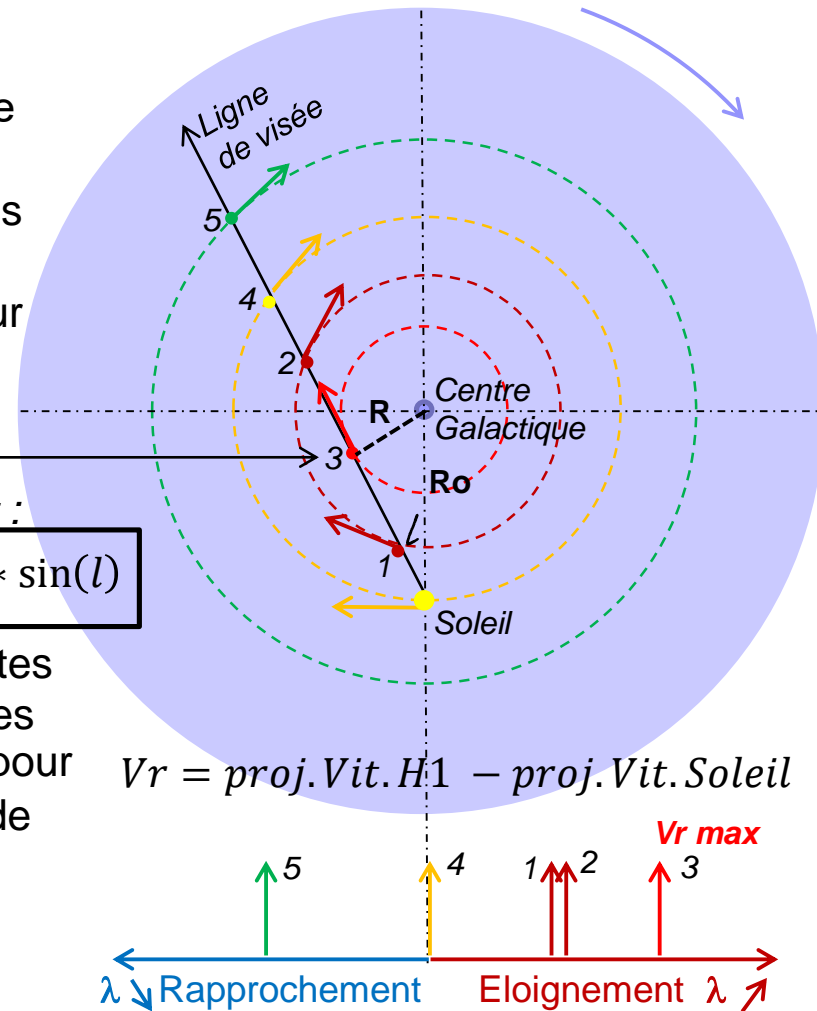
Il peut y avoir de nombreux nuages d'hydrogène le long de la ligne de visée et ainsi obtenir plusieurs constituants spectraux. Le constituant ayant la plus grande vitesse radiale  $V_r$  max se trouve alors au point tangentiel « 3 » où nous observons le vecteur vitesse aligné sur la ligne de visée.

A ce point tangentiel nous avons :  $R = R_0 * \sin(l)$

De Eq1 =  $V_r = V * \frac{R_0}{R} * \sin(l) - V_0 * \sin(l)$  on écrit :

$$V_{r_{max}} = V - V_0 * \sin(l) \Rightarrow \text{Eq2 } V = V_{r_{max}} + V_0 * \sin(l)$$

En observant à des longitudes galactiques différentes nous pouvons alors mesurer  $V_r$  max pour différentes valeurs de  $l$ . Nous pouvons alors calculer  $R$  et  $V$  pour chaque  $l$  et déterminer la courbe de rotation  $V(R)$  de notre galaxie.



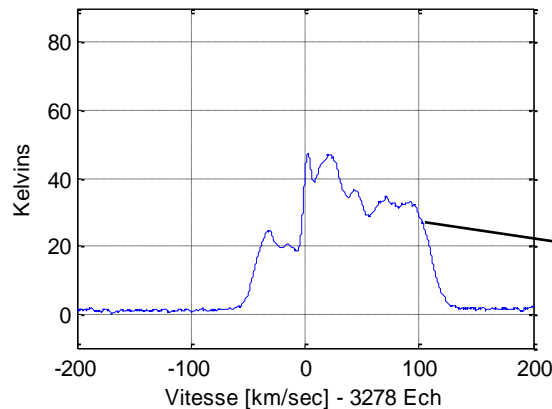
# Observation de notre galaxie à 21cm

- L'Hydrogène atomique neutre dans notre Galaxie
- Notre Galaxie
- Principes de l'observation
  - Géométrie de la galaxie => Principales équations
  - Relevé des différents spectres dans le plan galactique pour les longitudes galactiques visibles depuis l'IDF.
    - En déduire la carte radio (Doppler vs Longitude galactique)
    - Déterminer la vitesse de rotation dans la galaxie  $V(R)$
- But
  - Localiser les masses d'hydrogène dans notre galaxie à partir des mesures de leurs vitesses radiales.
  - Tracer la carte 2 D (X/Y) de notre galaxie

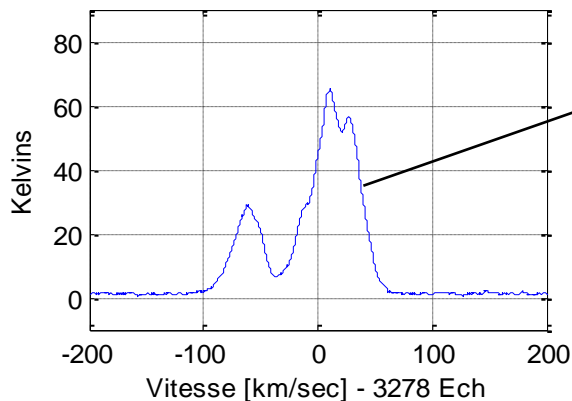
# Observation de notre galaxie à 21cm

- Le signal reçu est traité par un programme rapide qui, à l'aide de la technique de la Transformée de Fourier Rapide (TFR ou FFT : décomposition en composantes fréquentielles) nous permet d'obtenir le spectre radio à 21 cm.

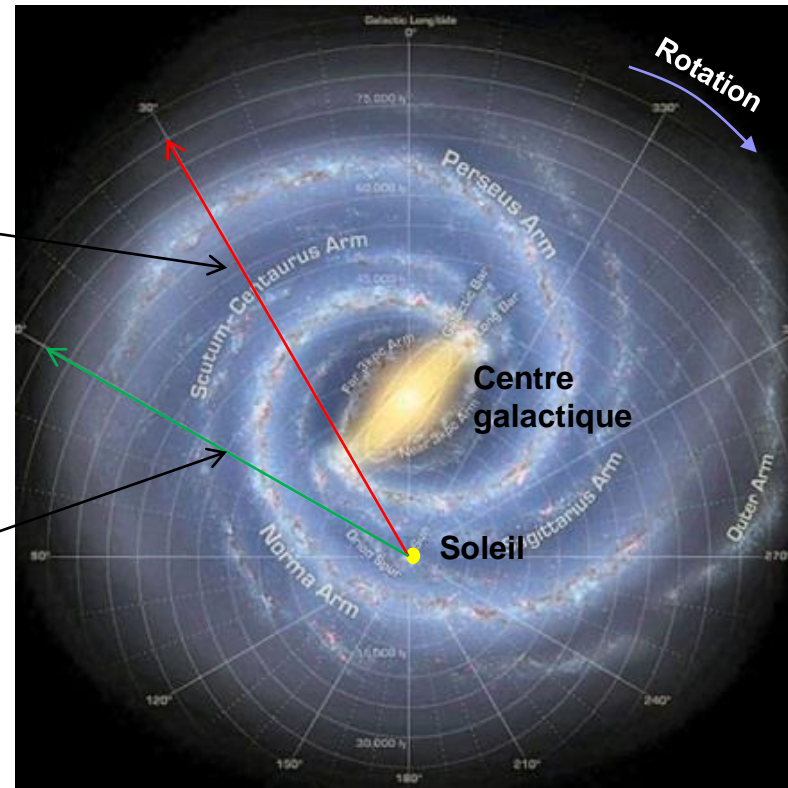
l = 28° - Spectre moyenné sur 4096 FFT, normalisé



l = 60° - Spectre moyenné sur 4096 FFT, non normalisé

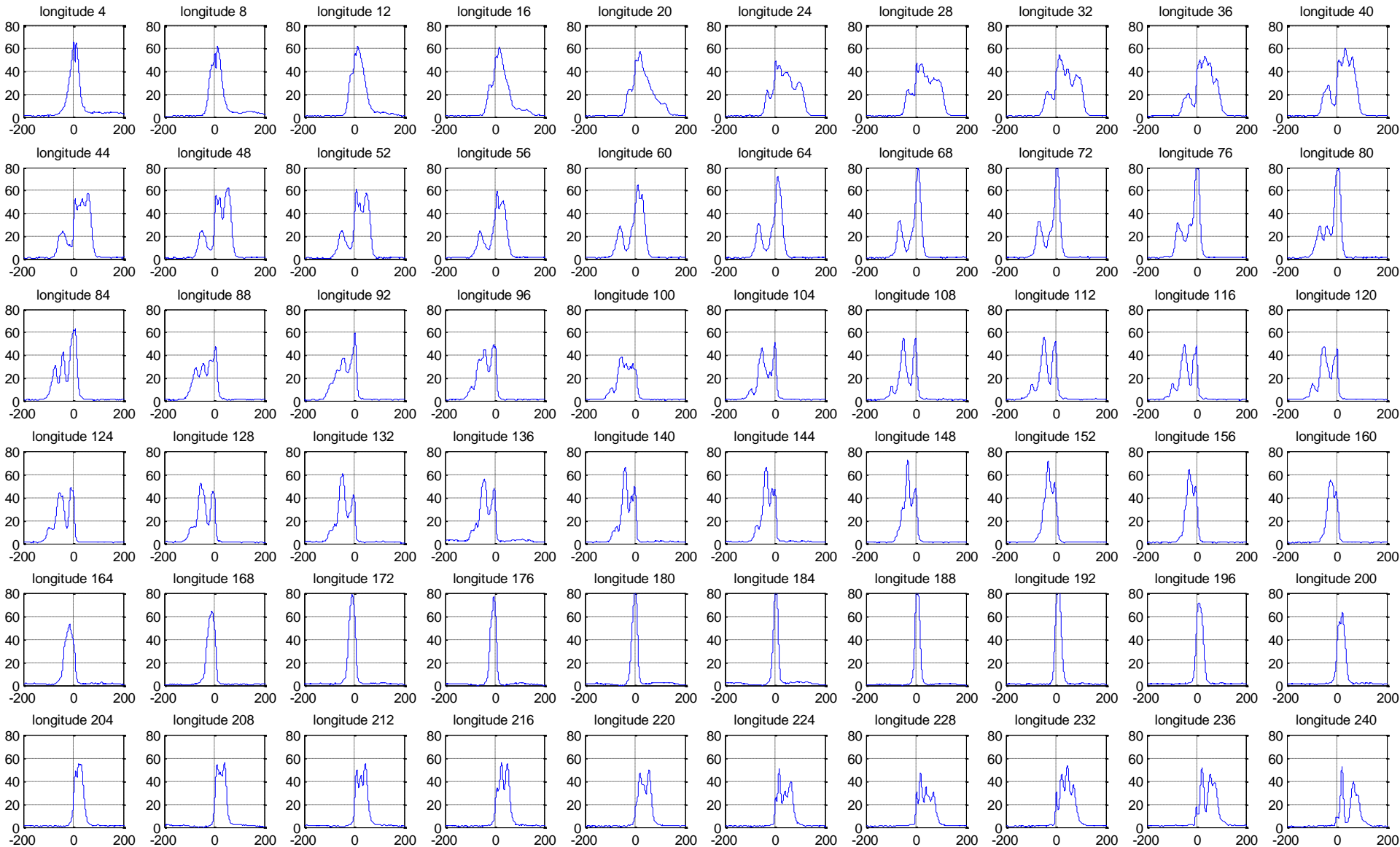


$l$  = Longitude galactique



Lignes de visée :  

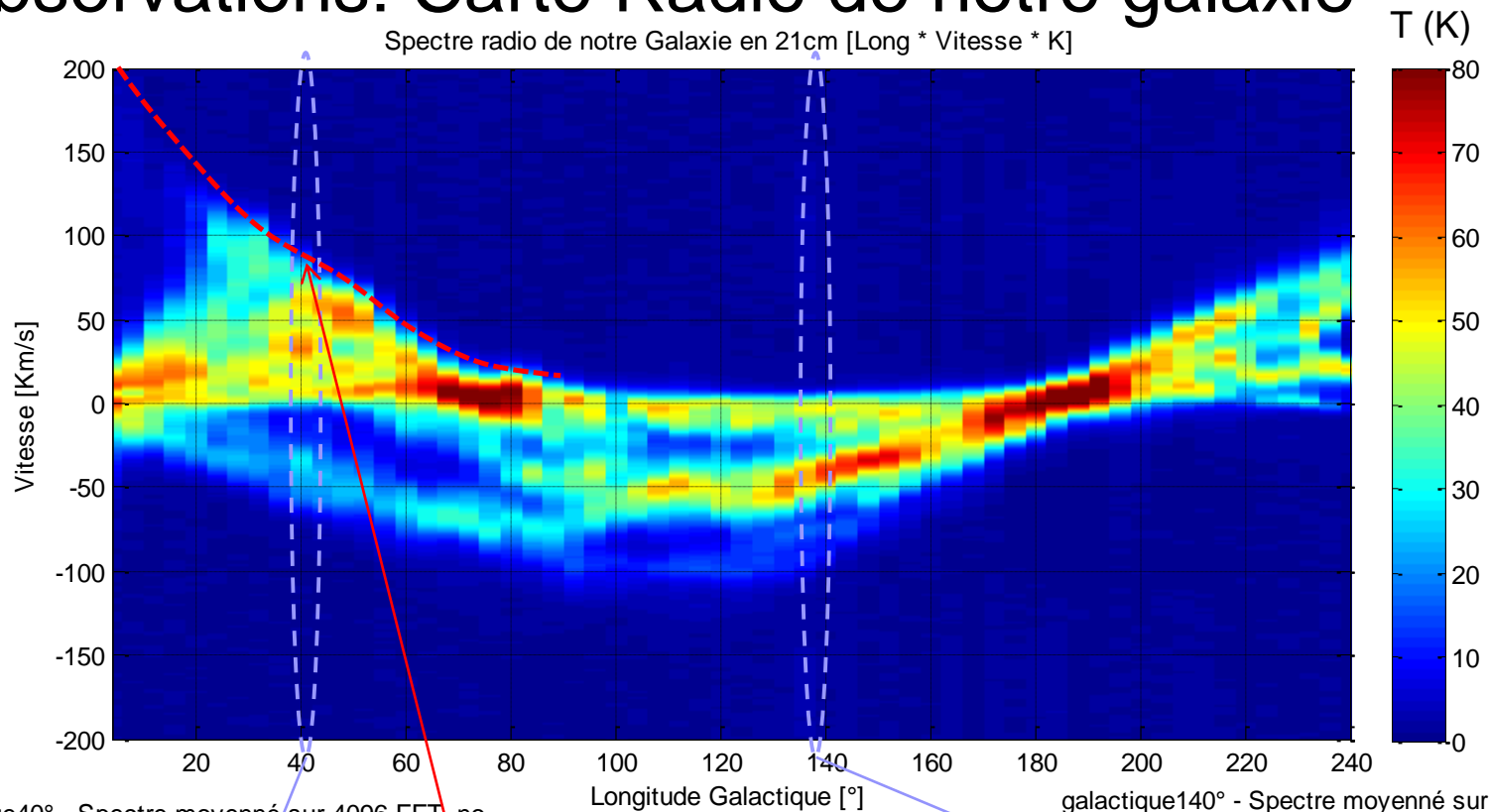
# Observations: Spectres relevés pour longitudes de 4 à 240°



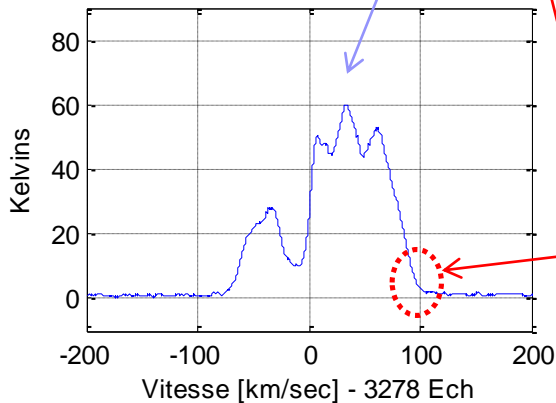


# Observations: Carte Radio de notre galaxie

Spectre radio de notre Galaxie en 21cm [Long \* Vitesse \* K]



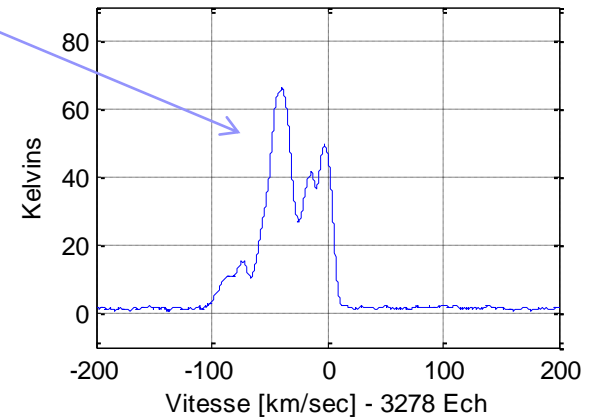
galactique40° - Spectre moyenné sur 4096 FFT, no



60 spectres juxtaposés  
Pas de 4° (HPBW)

$V_{r\_max}$   
à  $l = 40^\circ$

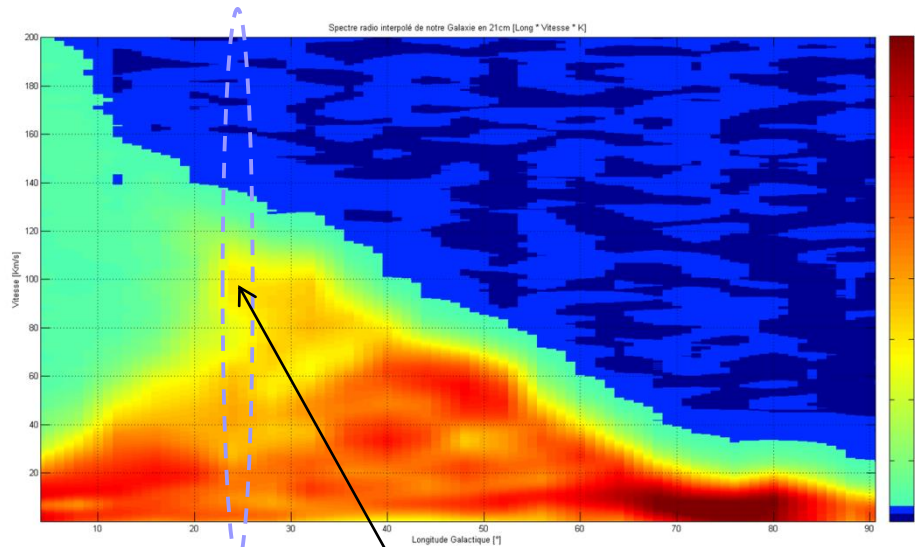
galactique140° - Spectre moyenné sur 4096 FFT, nor



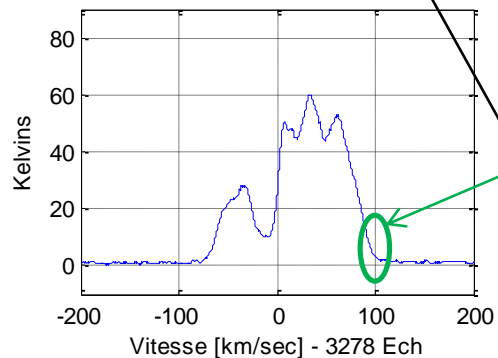
# Observation de notre galaxie à 21cm

## ■ Rotation de la galaxie

En renforçant les contours de la carte Doppler / Longitude, il est possible de faire apparaître les vitesses radiales maximales mesurées.



galactique40° - Spectre moyenné sur 4096 FFT, no



$V_r \text{ max}$   
à  $l = 40^\circ$

# Observation de notre galaxie à 21cm

## ■ Rotation de la galaxie

Des valeurs relevées sur la courbe précédente, on peut en déduire la courbe de rotation de la galaxie (voir géométrie). Sachant que :

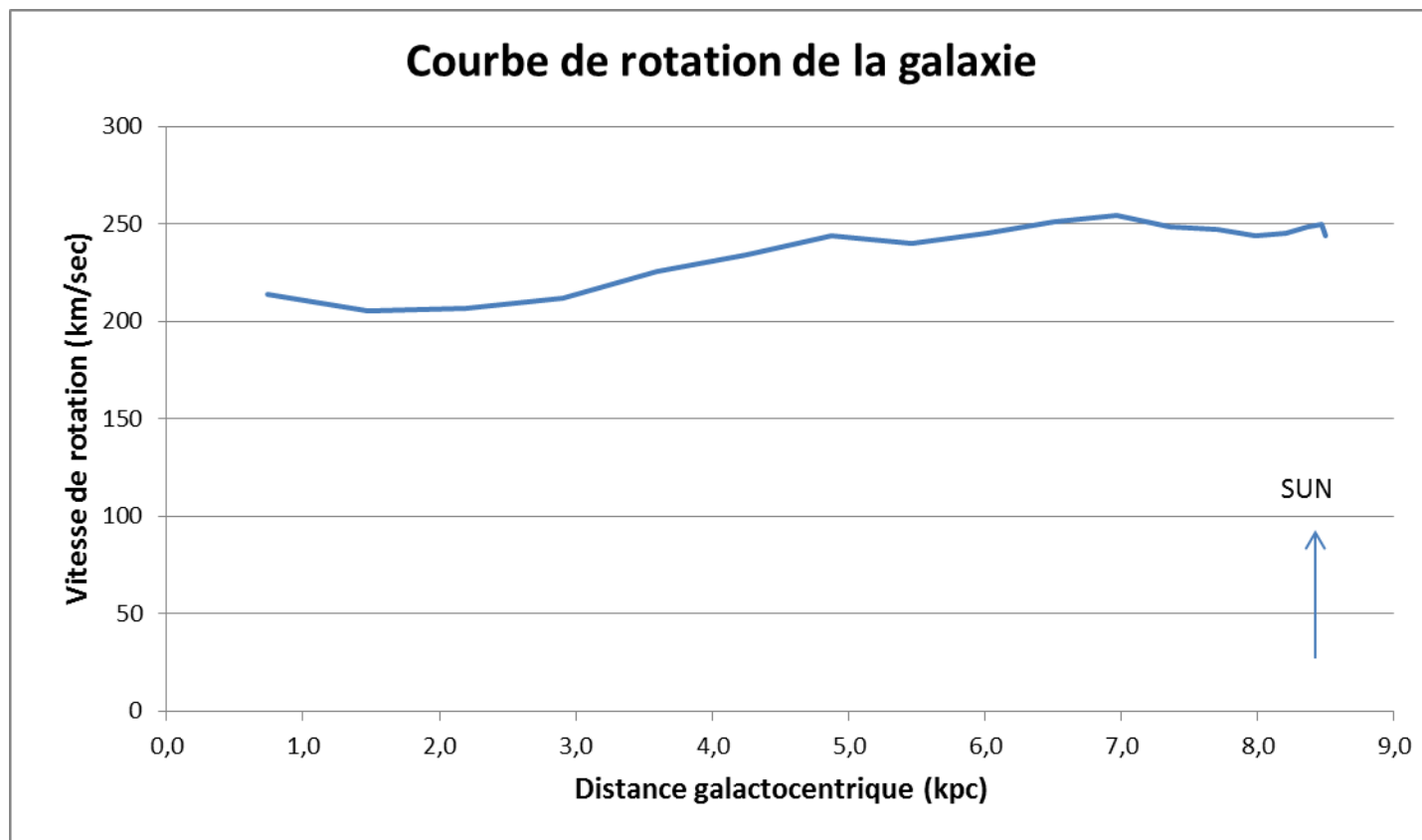
$$V(R) = Vr_{\max} + Vo * \sin(l) , Vo = 220 \text{ km/s} , R = Ro * \sin(l) , Ro = 8,5 \text{ kpc}$$

Longitude Galactique	$Vo * \sin(l)$	$Vr_{\max}$	V (R) (km/sec)	R (kpc)
5	19	195	214	0,7
10	38	167	205	1,5
15	57	150	207	2,2
20	75	137	212	2,9
25	93	133	226	3,6
30	110	124	234	4,3
35	126	118	244	4,9
40	141	99	240	5,5
45	156	90	246	6,0
50	169	83	252	6,5
55	180	74	254	7,0
60	191	58	249	7,4
65	199	48	247	7,7
70	207	37	244	8,0
75	213	33	246	8,2
80	217	32	249	8,4
85	219	31	250	8,5
90	220	24	244	8,5

# Observation de notre galaxie à 21cm

## ■ Rotation de la galaxie

Du tableau précédent, on peut tracer la courbe de rotation de la galaxie :  
Vitesse de rotation en fonction de la distance galactocentrique



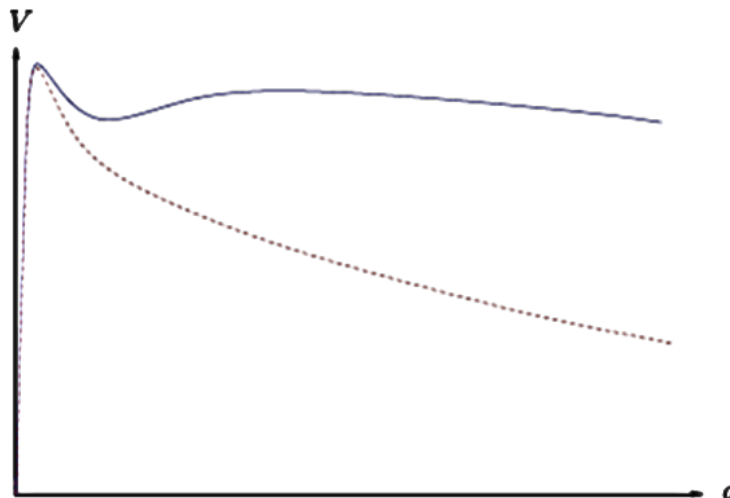
# Observation de notre galaxie à 21cm

## ■ Rotation de la galaxie - Conclusion

La courbe obtenue est proche de celle attendue. Contrairement à la courbe de rotation des systèmes comme le système solaire avec une grande masse centrale, la plupart des galaxies présente des courbes de rotation plates, où  $V(R)$  ne dépend pas de  $R$  au-delà d'un certain rayon.  $V(R) = \text{constante}$

La vitesse angulaire varie comme  $\Omega \propto 1/R$ . La matière près du centre est en rotation avec une vitesse angulaire plus grande que la matière plus éloignée.

Pour de grands rayons, les vitesses sont manifestement plus grandes que dans des cas Képlérien et cela est une preuve de l'existence de matière supplémentaire pour des grands rayons. C'est une voie indirecte pour montrer l'existence de la matière sombre dans la galaxie.



Courbe de rotation de la voie lactée

Courbe de rotation attendue suivant loi de Képler

# Observation de notre galaxie à 21cm

## ■ Localisation de l'hydrogène neutre H1

$V(R)$  étant constante et  $V = V_0$

Eq1:  $Vr = V \cdot \frac{R_0}{R} \cdot \sin(l) - V_0 \cdot \sin(l)$  devient alors :

$Vr = V_0 \cdot \sin(l) \cdot \left( \frac{R_0}{R} - 1 \right)$  d'où :

**Eq3**  $R = R_0 \cdot V_0 \cdot \sin(l) / (V_0 \cdot \sin(l) + Vr)$

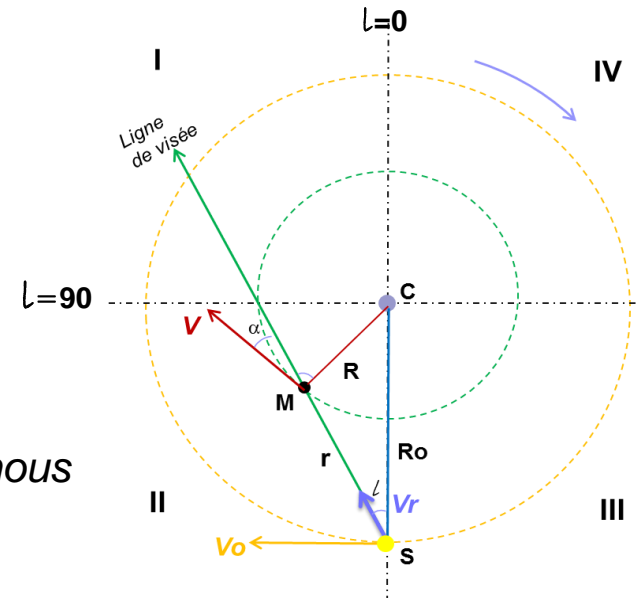
D'après le théorème d'Al-Kashi, dans le triangle CSM, nous avons :  $R^2 = R_0^2 + r^2 - 2 \cdot R_0 \cdot r \cdot \cos(l)$

C'est une équation du second degré en  $r$ , qui a deux solutions possibles  $r_+$  et  $r_-$

**Eq4**  $r_{\pm} = \pm \sqrt{R^2 - R_0^2 \cdot \sin^2(l)} + R_0 \cdot \cos(l)$

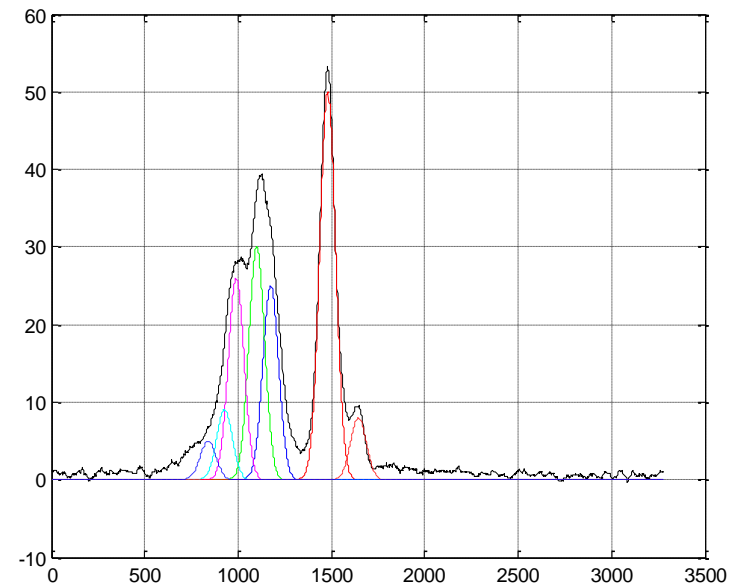
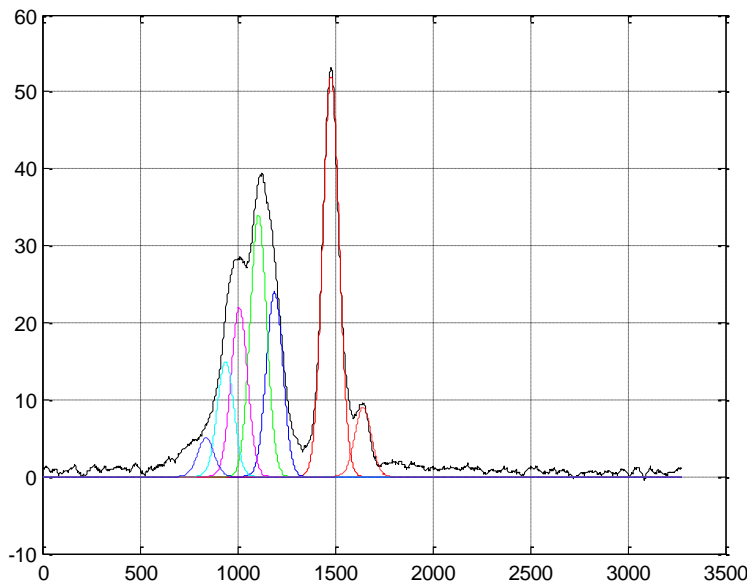
$r$  étant la distance entre la station et la masse d'hydrogène

- Si  $\cos l < 0$  (quadrants II ou III), on peut montrer qu'il n'y a qu'une et une seule solution positive  $r_+$  car  $R$  est toujours plus grand que  $R_0$ .
- Dans les autres quadrants, il y a 2 solutions positives. Si on obtient deux solutions positives, on devra observer selon la même longitude galactique mais à une latitude différente afin de déterminer quelle solution est correcte.
- Les valeurs négatives de  $r$  sont éliminées car elles n'ont pas de réalité physique.



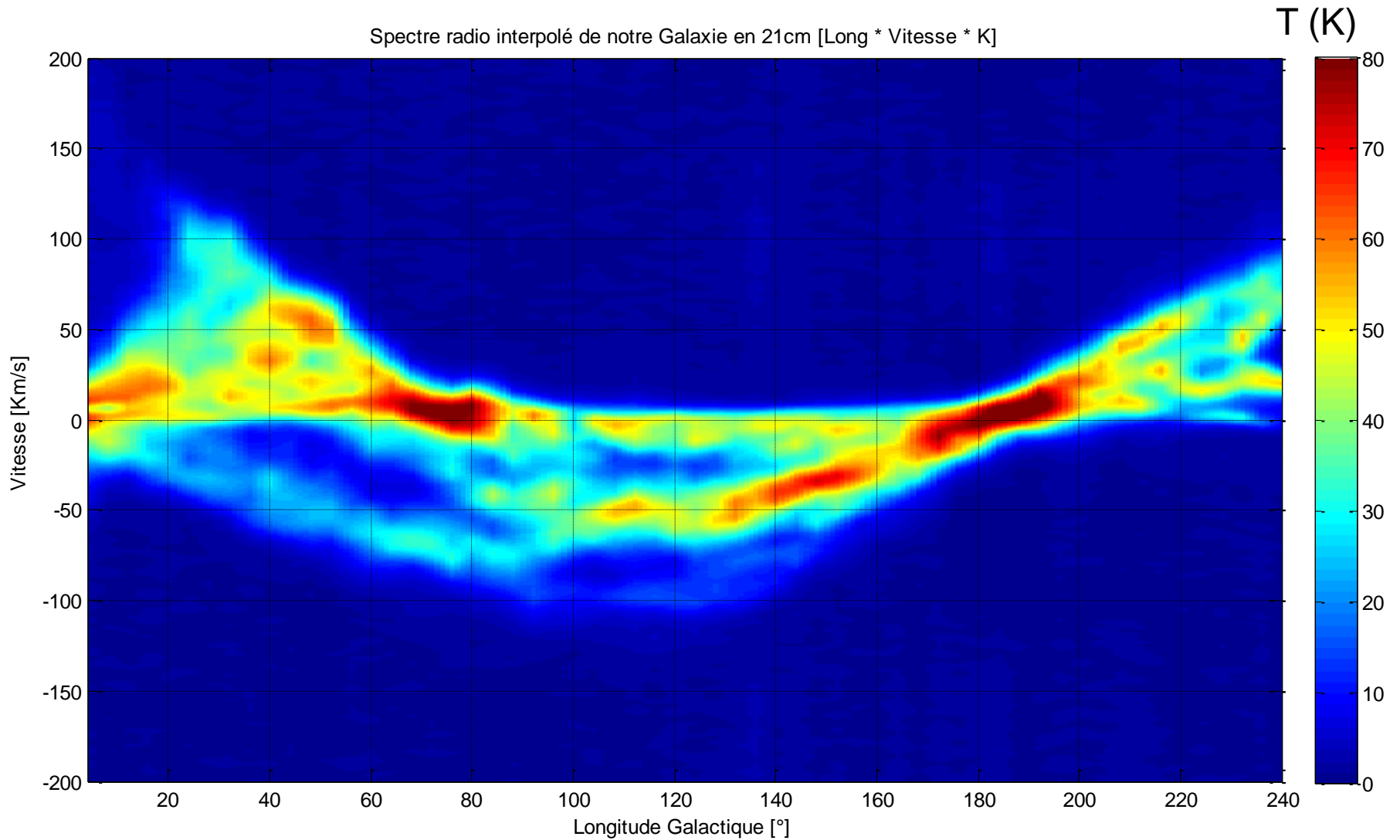
# Observation de notre galaxie à 21cm

- Localisation de l'hydrogène neutre H1
  - Pour chaque direction visée dans le plan galactique, suivant une longitude galactique, nous avons obtenu un spectre composite.
  - Nous pouvons supposer que chaque spectre inclue de multiples composantes et donc le décomposer en un grand nombre de profils « gaussiens » correspondant à un grand nombre de nuages. Voir l'exemple ci-dessous mais la solution n'est pas unique...
  - De plus chaque composante peut avoir une vitesse radiale, une amplitude, une largeur (fluctuation interne aux nuages) différentes.



# Observations: Carte Radio – Interpolée 3D

Spectre radio interpolé de notre Galaxie en 21cm [Long \* Vitesse \* K]





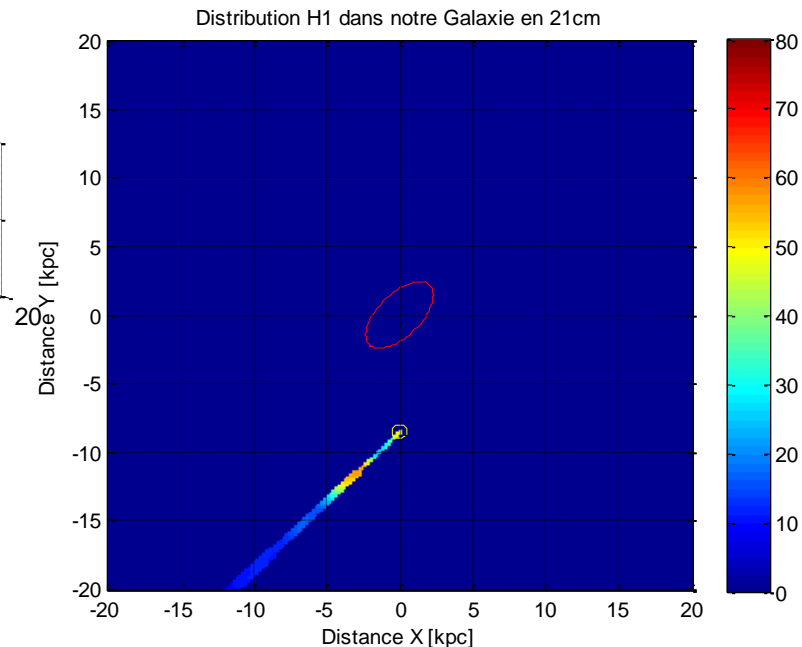
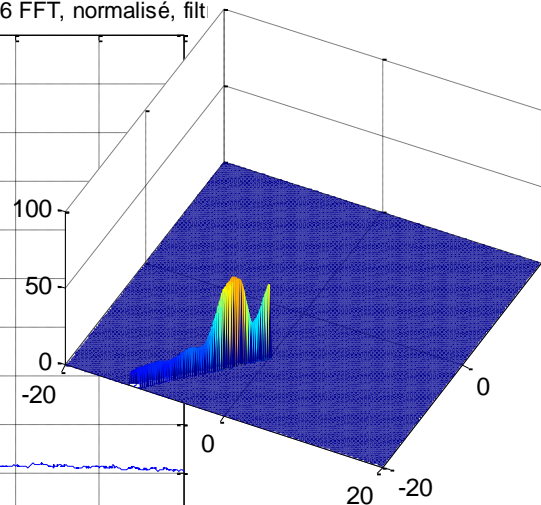
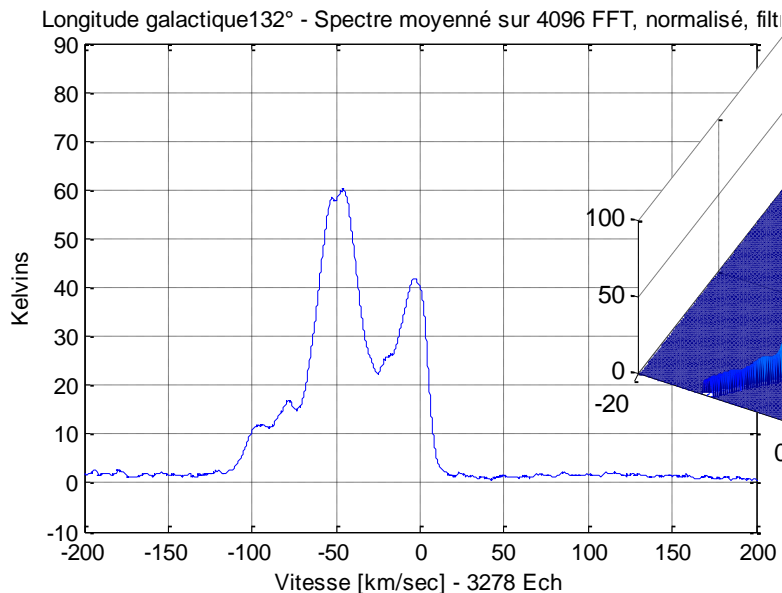
# Observation de notre galaxie à 21cm

- L'Hydrogène atomique neutre dans notre Galaxie
- Notre Galaxie
- Principes de l'observation
  - Géométrie de la galaxie => Principales équations
  - Relevé des différents spectres dans le plan galactique pour les longitudes galactiques visibles depuis l'IDF.
    - En déduire la carte radio (Doppler vs Longitude galactique)
    - Déterminer la vitesse de rotation dans la galaxie  $V(R)$
- Résultats de l'observation
  - Calculer la position dans notre galaxie des masses d'hydrogène à partir des mesures de leurs vitesses radiales.
  - Tracer la carte 2 D (X/Y) de notre galaxie

# Observation de notre galaxie à 21cm

## ■ Localisation de l'hydrogène neutre H1

- On observe que les nuages se déplacent suivant une vitesse principale due au moment de rotation autour de la galaxie.
- L'élargissement spectral de la raie d'hydrogène est principalement dû aux mouvements internes aux nuages.
- Ainsi, pour localiser les masses d'hydrogène, il est choisi d'associer de projeter le spectre mesuré sur l'axe de visée (suivant les formules présentées ci-dessus). Exemple pour  $\text{long} = 132^\circ$



# Observation de notre galaxie à 21cm

## ■ Localisation de l'hydrogène neutre H1

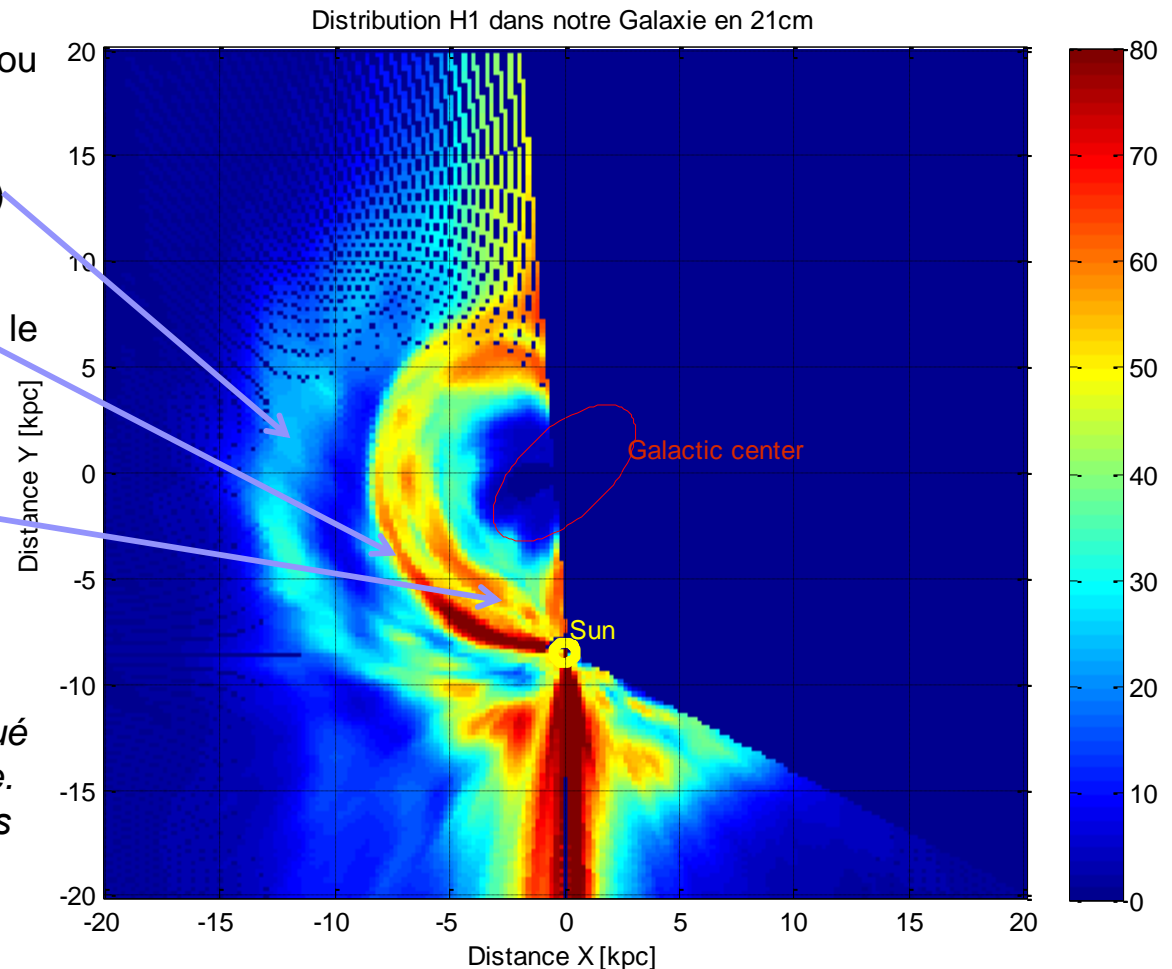
- Pour l'ensemble des mesures effectuées suivant les longitudes galactiques allant de 4 à 240°.

Il est alors possible de distinguer 2 ou 3 bras de notre galaxie :

- Un premier assez éloigné du centre galactique (env 12,5 kpc) et à l'extérieur de notre orbite
- Un second correspond à notre bras local dans lequel se trouve le soleil
- Un troisième à l'intérieur de l'orbite solaire.

Remarques :

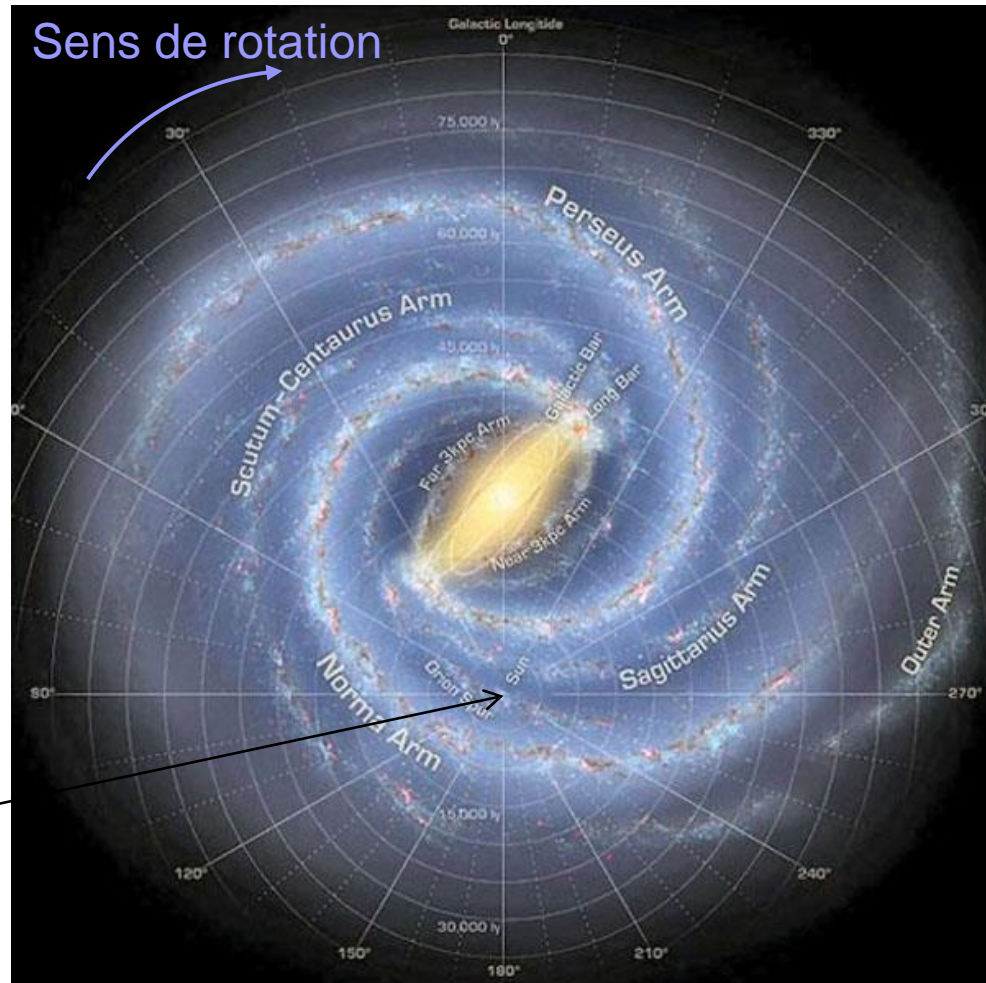
- ✓ La carte représente l'amplitude des signaux reçus et non le volume d'hydrogène. Un calcul complémentaire doit être effectué pour tenir compte de la distance.
- ✓ Les risques d'ambiguïté pour les longitudes  $<90^\circ$  ne sont pas traités.



# Observation de notre galaxie – Repères

$l$  = Longitude galactique

Sens de rotation



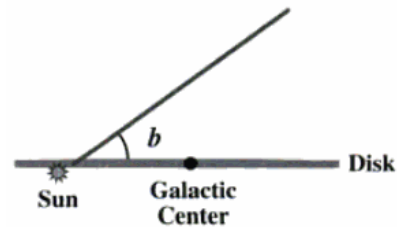
- Notre position dans la galaxie

130 000 années lumière soit env 40 kpc

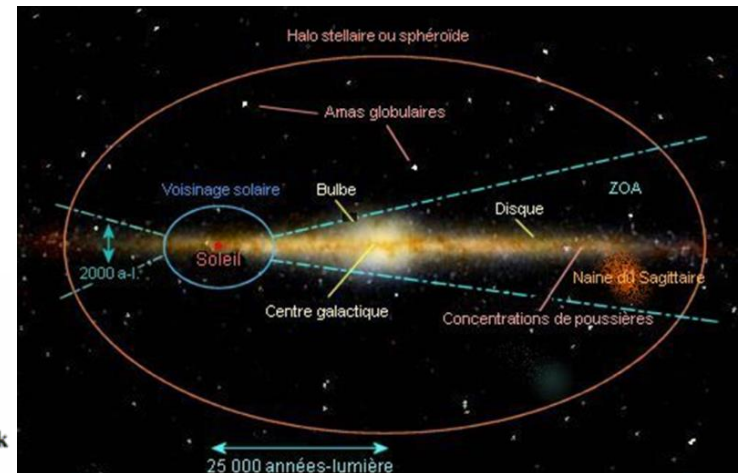
# Observation de notre galaxie à 21cm

## ■ La suite ....

- Observations en dehors du plan galactique pour :
  - Mesurer l'épaisseur du disque galactique en effectuant des relevés à différentes latitudes galactiques



- A partir de ces mesures, mettre en évidence la déformation du plan galactique (WARP)



# Informations et bibliographie

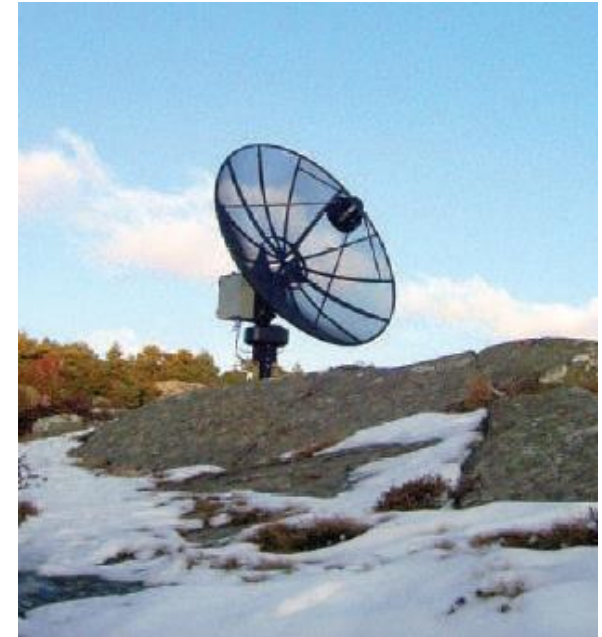
- Pour compléter cette présentation se reporter aux présentations suivantes :
  - Station de radioastronomie en 21cm
  - Récepteurs
  - Toutes les présentations concernant la radioastronomie sont sur le site Internet de JJ MAINTOUX - F1EHN <http://www.f1ehn.org> page « Radioastronomie ».
- Bibliographie :
  - Extraits de « Technical developments » at IRA-INAF (Présentation de [l'observatoire de Medicina \(Italie\)](http://www.med.ira.inaf.it/index_EN.htm) [http://www.med.ira.inaf.it/index\\_EN.htm](http://www.med.ira.inaf.it/index_EN.htm)
  - <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3265>
  - <http://radiometrie.free.fr/I-A.htm>
  - [Observatoire de Paris - Les antennes](http://www.lesia.obspm.fr/plasma/Goutelas2007/Presentations/Picard/Picard-Ant.pdf)  
<http://www.lesia.obspm.fr/plasma/Goutelas2007/Presentations/Picard/Picard-Ant.pdf>
  - **Radioastronomy** (2<sup>nd</sup> edition) par John D.Kraus
  - Extraits de **Astronomy – A Physical Perspective** par Marc L.Kutner (chapitre 16 – The Milky-Way galaxy)
  - Raie à 21cm – Wikipédia [http://fr.wikipedia.org/wiki/Raie\\_%C3%A0\\_21\\_centim%C3%A8tres](http://fr.wikipedia.org/wiki/Raie_%C3%A0_21_centim%C3%A8tres)

# Informations et bibliographie

## ■ Site Hands on universe

[http://www.fr.euhou.net/index.php?option=com\\_frontpage&Itemid=1](http://www.fr.euhou.net/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1)

- L'institut d'ONSALA a édité une note dont qq extraits ont été utilisés pour rédiger les planches précédentes.
- Des résultats de mesures effectuées avec le radiotélescope SALSA\* permettent de bien analyser et préparer l'observation de notre galaxie à 21cm.
- [Retrouver cette note ici](#)  
<http://www.fr.euhou.net/docupload/files/traductions/sources/radiosuede.pdf>
  
- Le Radiotélescope SALSA  
Such A Lovely Small Antenna =>



## ■ Le site de Joachim Köppen (très documenté)

<http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/Haystack/index.html>

[Radio Astronomy with the 21 cm Hydrogen Line at the International Space University](#)

## ■ Observatoire de Paris Meudon – Cours d'astronomie

<http://aramis.obspm.fr/~combes/fcombes/cours-astro/index.html>

Document sous licence CC BY-SA



Contact : [jim\\_f1ehn@wanadoo.fr](mailto:jim_f1ehn@wanadoo.fr)

# Observation de notre galaxie à 21cm

## ■ Annexe technique

- Format des données d'acquisition
- Normalisation : justification des mesures solaires
- Correction Doppler : Analyse des mesures



# Format des données

- Entête (description de l'acquisition) :
  - Nom de fichier : ex : 20090703\_095157\_120\_0.dat (indique la date, heure, la longitude et la latitude galactiques de mesure)
  - Paramètres d'acquisition (fixes ou modifiable par programmation)
    - Freq FI in : 60 MHz => Fréquence FI du récepteur
    - Freq Ech : 80 MHz => Fréquence d'échantillonnage en entrée
    - FI Num : 20 MHz => FI numérique du récepteur numérique
    - Décimation : 32 => Facteur de décimation des données (filtrage)
    - Bande : 2.5 MHz => Bande passante du filtre numérique
  - Paramètres de mesure (ajustables par l'opérateur ou variables)
    - Longitude : 120 => longitude galactique de mesure
    - Latitude : 0 => latitude galactique de mesure (0 correspond au plan galactique)
    - Nbre Bloc : 8192 => nombre de blocs de données contenant Nbre Ech
    - Nbre Ech : 4096 => nombre d'échantillons par bloc de données
    - Freq OL : 1480.4057 MHz => fréquence d'OL utilisée
    - Freq RF : 1420.4057 MHz => fréquence de réception (OL – FI)
    - VLSR : 13,5 km/s => Vitesse relative de la station sur la ligne de visée
    - Niveau reçu : 0,5 dB => Niveau reçu par la station par rapport à la calibration
  - Lu par fonction « traitement\_entete »

# Format des données

- Blocs de données :
  - Tous les blocs sont de taille identique
  - Nombre de blocs définis par l'opérateur : par calcul et expérience, 4096 blocs sont nécessaires pour le traitement de notre galaxie. Un nombre plus important peut être nécessaire pour des observations plus difficile. Le nombre de blocs est indiqué dans l'entête.
  - Description d'un bloc
    - Signal complexe (I & Q)
    - Chaque composante est codée sur 32 bits (4 octets)
    - 4096 échantillons complexes
    - Cadence en sortie de 2.5 MEch/s (autorisant une bande utile de 2 MHz)
    - Soit une cadence de 20 Mo/s
  - Lu par fonction « traitement\_21cm ». Cette fonction fait appel à « traitement\_entete » et effectue le traitement détaillé dans les pages suivantes.

# Traitement des données

## ■ Normalisation - Justification des mesures solaires:

■ Soit  $T$  = Température,  $k$  = cste Boltzmann,  $cs \Rightarrow$  ciel froid,  $sun \Rightarrow$  soleil,  $sys \Rightarrow$  system,  $F=1420\text{MHz}$ ,  $\lambda \Rightarrow$  longueur d'onde =  $c/F \Rightarrow \lambda=0.211\text{m}$ ,  $A_{\text{eff}}$  = Aire efficace,  $Bw$  = Bande passante,  $NF$  = Noise figure,  $L_r$  = Pertes en réception = 1,023 (0,1 dB),  $T_r$  = Température de bruit du récepteur = 34K ( $NF=0,48\text{dB}$ ).

□ Antenne :  $D=3.3\text{m}$ ,  $\text{Gain}=31\text{dBi} \Rightarrow G=1260$ ,  $A_{\text{eff}} = G \cdot \lambda^2 / 4\pi = 4.46\text{m}^2$

□ Diagramme :  $\text{Ouv}=4.4^\circ$  (mesure),

□  $T_{\text{ant}}_{cs} = 15\text{K}$  ( $T_{\text{ciel}} \sim 5\text{K}$ ,  $T_{\text{lobes}} = 10\text{K}$  estimés d'après mesures)

□  $T_{\text{sys}}_{cs} \Rightarrow$  Température système référencé sur ciel froid

$$T_{\text{sys}}_{cs} = (T_{\text{ant}}_{cs} + (L_r - 1) \cdot 290\text{K}) + L_r T_r \Rightarrow \underline{T_{\text{sys}}_{cs} = 57\text{K}}$$

□ Flux solaire = 53 sfu d'après observatoire (=  $53 \cdot 10^{-22} \text{W/m}^2/\text{Hz}$ )

□  $T_{\text{ant}}_{sun} = \text{Flux} \cdot A_{\text{eff}} / (2 \cdot k) \Rightarrow \underline{T_{\text{ant}}_{sun} = 856\text{K}}$  pour une polarisation

□ La mesure de signal reçu est de la forme  $(S+B)/B$  avec

■  $S = k \cdot T_{\text{ant}}_{sun} \cdot Bw$

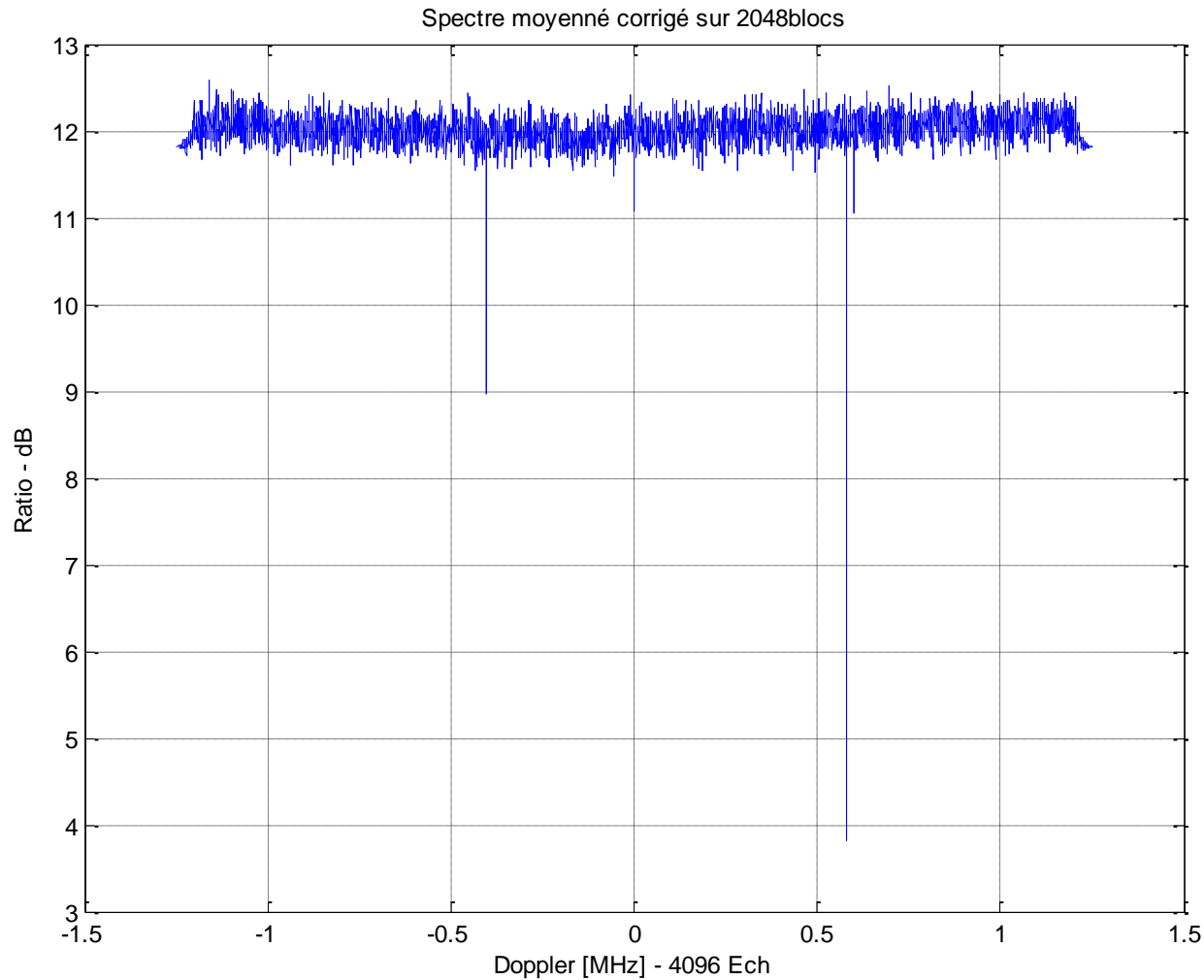
■  $B = k \cdot T_{\text{sys}}_{cs} \cdot Bw$

■ Excès de bruit solaire =  $(T_{\text{ant}}_{sun} / T_{\text{sys}}_{cs}) + 1 = 16 \Rightarrow$  (ou  $10 \cdot \log(16) = 12\text{dB}$ )

□ **soit un facteur 16 ou 12.0 dB entre 2 pointages de l'antenne en direction d'une zone « froide » du ciel et le soleil. Ce facteur est communément appelé facteur Y**

# Traitement des données

- Normalisation - Mesure Soleil / Ciel froid



Valeur moyenne  
= 12.0 dB

# Traitement des données

## ■ Normalisation

- La mesure précédente montre que la station 21 cm présente un facteur  $Y=16$  (ou 12 dB) pour une température système passant de 57K ( $T_{\text{sys\_cs}}$ ) sur ciel froid à environ 913K sur le soleil ( $T_{\text{ant\_sun}} + T_{\text{sys\_cs}}$ ).
- Le but de la normalisation est de mettre en évidence l'élévation de la température d'antenne entre ces 2 pointages :
  - La température d'antenne est donc égale à
    - $T_{\text{ant}} = (Y - 1) * T_{\text{sys\_cs}}$
  - Par exemple, pour une mesure présentant un rapport égal à 3 nous pouvons en déduire une élévation de température d'antenne de  $(3-1)*57$  soit 114 K. Un rapport égal à 1 correspond bien sûr à 0K.
  - Si l'on applique ce calcul à la mesure précédente, soit  $(16-1)*57$ , nous retrouvons bien 855 K ce qui correspond bien à l'élévation de température d'antenne apportée par la présence du soleil dans l'ouverture angulaire.
- *Remarque : Le facteur  $Y$  est un rapport de 2 puissances. Si l'on relève les signaux à partir de tensions, il y a lieu d'élever ce facteur  $y$  au carré. Alors  $Y = y^2$ . Par la suite, tous les calculs restent identiques. Toutefois pour passer en dB, il faudra appliquer la formule ratio en dB =  $20*\log(y)$ .*

# Traitement des données

- Correction Doppler :
  - L'analyse des mesures montre :

Longitudes écliptiques	13/06/09	03/07/09
130°	à 17h55	à 16h50 <b>(+25 kHz)</b>
230°	à 17h12	à 11h26 <b>(+35 kHz)</b>
	En heure locale	+ 2h / UTC
Conversion 130°	RA = 1h 48mn 45.3sec	Dec = 61° 47' 13.9"
Conversion 230°	RA = 7h 21mn 2.1sec	Dec = -16° 57' 19.2"
Lat / Lon Moulon	48.780242 N	2.179653 E
Altitude Moulon	150 m	

- Les calculs effectués avec VLSR (voir annexe) donne :

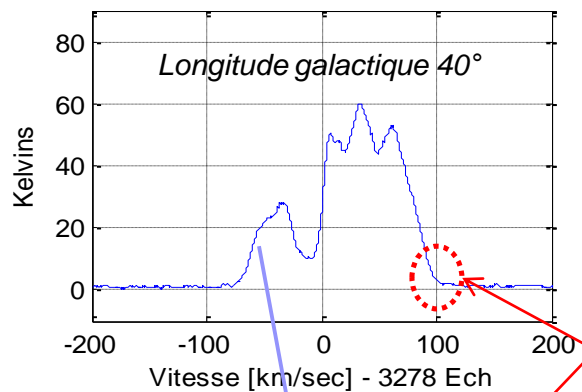
<b>VLSR en km/s</b>		
Longitudes	13/06/09	03/07/09
130°	-14.2	-19.5
230°	+27.8	+20.5

<b>Décalage Doppler LSR en KHz avec <math>\lambda = 0.21m</math></b>		
Longitudes	13/06/09	03/07/09
130°	67.6	92.9 <b>(+25.3)</b>
230°	-132.4	-97.6 <b>(+34.8)</b>

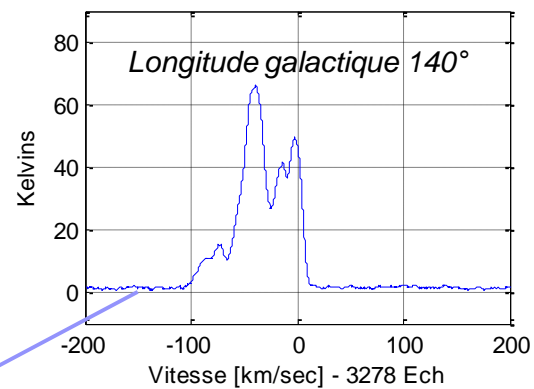
Les décalages observés correspondent à ceux calculer par VLSR

# Procédure pour mesures 21cm

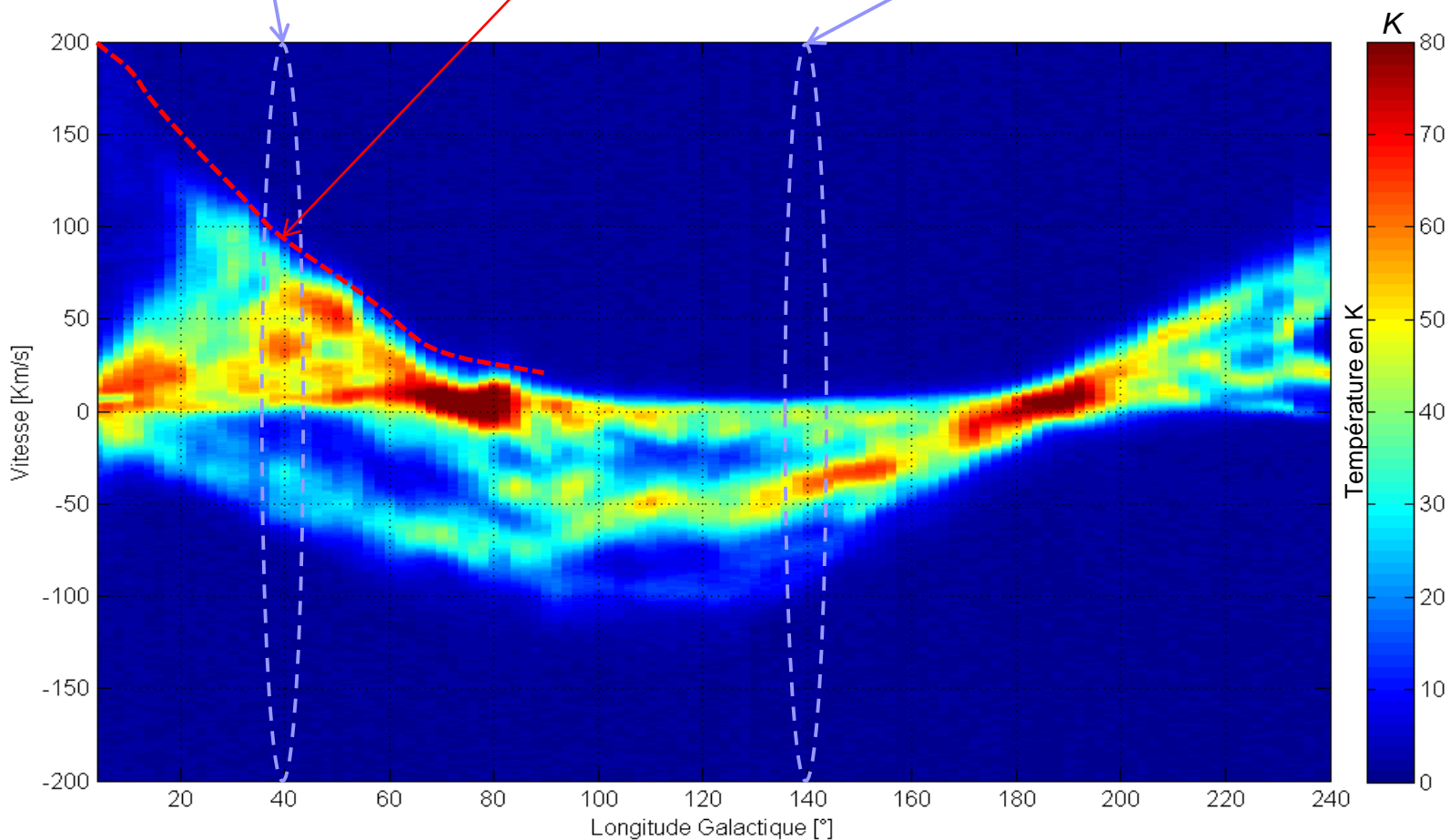
- Après mise en service, station OK, OL OK, et source RA/Dec UD (user Define)
- Lancer Matlab (Acq\_Ref et Acq\_H1)
  1. *CHOISIR UNE LONGITUDE GALACTIQUE (Latitude galactique = 0°)*
    - Arrêter la poursuite Auto si active (Track ou via Interface)
    - Saisir une Longitude dans Long Conv (Contrôle OL)
    - Cliquer sur Ra/Dec> (OL) pour transférer les coordonnées RA/Decl à source UD
    - Vérifier que la position de source correspond à Long Conv
    - Si OK => Activer la Poursuite Auto (Track)
  2. *FAIRE UNE REFERENCE EN DECALANT LA FREQUENCE DU RECEPTEUR*
    - Sélectionner OL = **+** ou **-2** (Contrôle OL) => Freq = 123,533813 MHz
    - Lancer « Acq\_Ref » dans Matlab et attendre la fin (affichage référence)
    - Vérifier le résultat (absence de signaux parasites - réponse du récepteur)
    - Fermer la fenêtre - La référence est automatiquement enregistrée
  3. *FAIRE LA MESURE DE LA RAIE D'HYDROGENE à 21cm*
    - Sélectionner OL = **0** (Contrôle OL) => Freq = 123,367147 MHz
    - Lancer « Acq\_H1 » dans Matlab et attendre la fin (affichage fenêtres)
    - Vérifier les résultats (Entête correct et base du signal proche de 0 K)
    - Le spectre mesuré est sauvegardé automatiquement « lonxxx.dat xxx = long. gal. »
  4. *REVENIR au POINT n°1 pour MESURE SUIVANTE*
    - Tous les 5° par exemple, attention au soleil, au sol (Vérifier le niveau de signal)



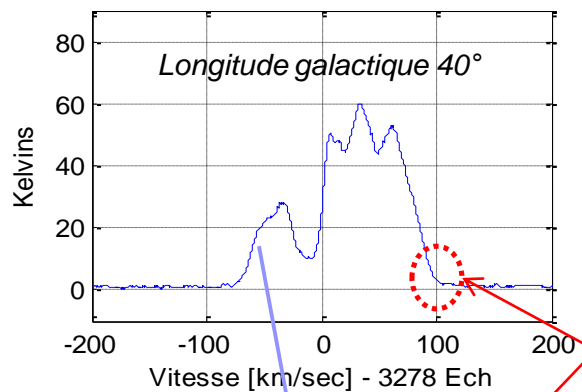
**Carte Radio à 21cm  
119 spectres juxtaposés**



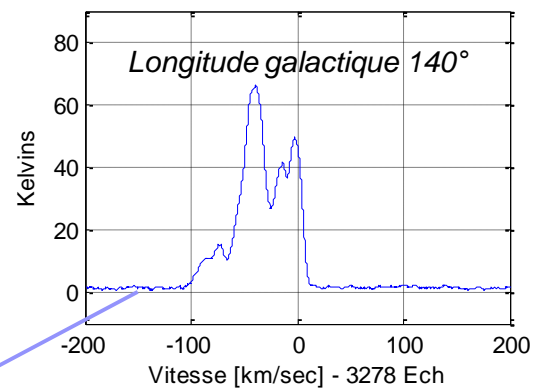
$V_{r\_max}$   
à  $l = 40^\circ$



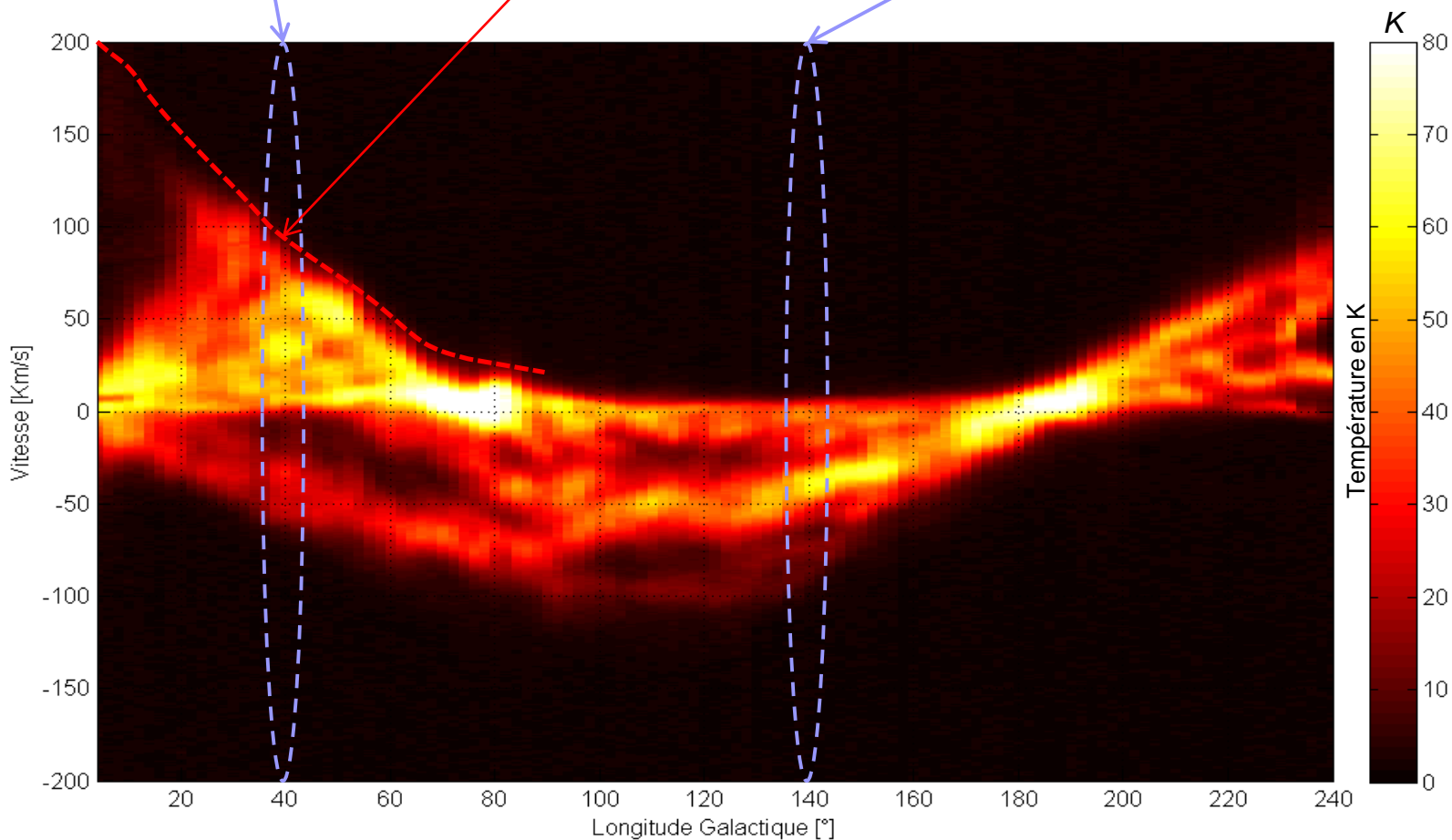




**Carte Radio à 21cm**  
**119 spectres juxtaposés**



$Vr\_max$   
à  $l = 40^\circ$



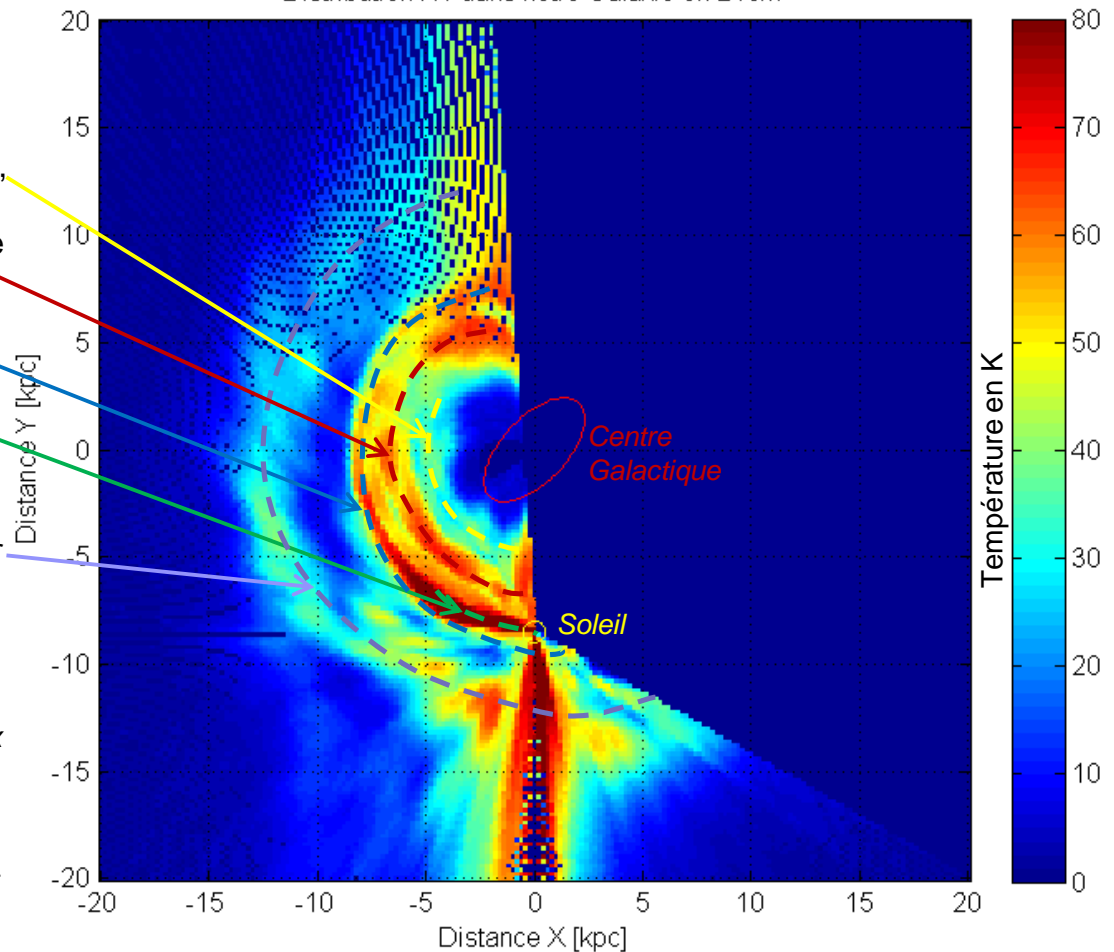
Distribution H1 dans notre Galaxie en 21cm

Nous appuyant sur les données connues (réf. 14), il est possible de distinguer 4 à 5 bras de notre galaxie :

- Le premier, difficile à mettre en évidence, appelé Scutum-Crux
- Un second à l'intérieur de l'orbite solaire (Bras du Sagittaire).
- Un troisième correspond au bras de Persée
- Un quatrième, notre bras local (ou bras d'Orion) dans lequel se trouve le soleil difficile à séparer du bras de Persée
- Un cinquième assez éloigné du centre galactique (env 12,5 kpc) et à l'extérieur de notre orbite (Bras du Cygne ou Extérieur)

Remarques :

- ✓ La carte représente l'amplitude des signaux reçus et non le volume d'hydrogène. Un calcul complémentaire doit être effectué pour tenir compte de la distance.
- ✓ Les risques d'ambiguïté pour les longitudes  $< 90^\circ$  ne sont pas traités.



## Document sous licence CC BY-SA



Contact : [jim\\_f1ehn@wanadoo.fr](mailto:jim_f1ehn@wanadoo.fr)

Nous appuyant sur les données connues (réf. 14), il est possible de distinguer 4 à 5 bras de notre galaxie :

- Le premier (en jaune), difficile à mettre en évidence, appelé Scutum-Crux
- Un second (en rouge) à l'intérieur de l'orbite solaire (Bras du Sagittaire).
- Un troisième (en bleu) correspond au bras de Persée
- Un quatrième (en vert), notre bras local (ou bras d'Orion) dans lequel se trouve le soleil difficile à séparer du bras de Persée
- Un cinquième (en gris) assez éloigné du centre galactique (env 12,5 kpc) et à l'extérieur de notre orbite (Bras du Cygne ou Extérieur)

Remarques :

- ✓ La carte représente l'amplitude des signaux reçus et non le volume d'hydrogène. Un calcul complémentaire doit être effectué pour tenir compte de la distance.
- ✓ Les risques d'ambiguïté pour les longitudes  $< 90^\circ$  ne sont pas traités.

