

Testing NenuFAR Mini-Arrays

Meudon, 23/9/2014

Data on databf.obs-nancay.fr

→request access to Emmanuel.Thetas@obs-nancay.fr

/databf/NenuFar/recepteur/Test_MR

Mai_2014_PZ

20140113_192007

20140106_110007

20140107_081607

20140108_083607

20131230_101007

decembre_2013

Octobre_2013_Jupiter

Septembre_2013

MR1

Jupiter_Test_Lofar

Tests_Fripon

CasA_10-16_12_2012

Mesures_gain_DAB

Stabilite_recepteur

Tests_système_phasage

Comparaison_ampli_antenne_unique

Drifts_radiosources_DAM_seul

/databf/NenuFar/recepteur/Test_MR/Mai_2014_PZ

Mai_2014_PZ.rtf

20140528_130607

20140527_131007

20140525_030407

20140524_030807

20140526_233207

20140525_233607

20140521_080007

20140519_065507

20140516_112007

Mai_2014_PZ.rtf

Les fichiers de données sont des Fits au format LSS (pas au format New_Routine)

Dans chaque répertoire:

- un fichier Fits dans la bande 10-88 MHz
- un fichier log au format txt (.mail)
- un fichier log au format txt pour le pointage (.poi), le fichier log de la première observation a un format différent des autres car le pointage a été fait en mode manuel alors que pour les autres observations, le pointage est en configuration automatique.

1) Un spectre dynamique de 48 heures avec les 3 MR pointés au zénith, et l'enregistrement de toutes les corrélations inter-MR.

Résolution temporelle modérée, 1 ou quelques sec / spectre.

databf/NenuFar/recepteur/Test_MR/Mai_2014_PZ/20140516_112007 (du 16 mai 11:20 UT au 18 mai 11:20 UT)

2) Idem mais avec un pointage des 3 MR au méridien à l'élévation du transit de Cas A: 78.56 deg. (= 90 - l latNan - decCasA l)

databf/NenuFar/recepteur/Test_MR/Mai_2014_PZ/

3) Idem mais avec un pointage des 3 MR au méridien à l'élévation du transit de Cyg A: 83.36 deg. (= 90 - l latNan - decCygA l)

databf/NenuFar/recepteur/Test_MR/Mai_2014_PZ/

4) 2 spectres dynamiques de 8h (transit $\pm 4h$), 2 jours consécutifs, avec tracking de Cas A (RA2000 = 23:23:26.3, Dec2000=+58.8267 deg) par les 3 MR, et enregistrement de toutes les corrélations inter-MR.

databf/NenuFar/recepteur/Test_MR/Mai_2014_PZ/

5) idem, avec tracking de Cyg A (RA2000 = 19:59:29.1, Dec2000=+40.7383 deg).

databf/NenuFar/recepteur/Test_MR/Mai_2014_PZ/

6) idem, avec tracking d'une région "vide" qui passe au zénith (RA = 9:40:00, Dec=+47.38 deg)

méridien pour le 27 mai: 17:10:17

méridien pour le 28 mai: 17:06:17

/databf/NenuFar/recepteur/Test_MR/Mai_2014_PZ/20140516_112007

20140516_112007.poi	118	(text)
LSS_20140516_112007.fits	17675403840	
20140516_112007.mail	11375	(text)

Reading_idl_LSS_fits_files_AC20131206.pdf

Reading FITS files from the LSS receiver

file = name of FITS file

The file has 2 levels of header plus 1 level of data.

Reading the level 0 header (PRIMARY) :

header0 = headfits(file, exten=0)

The routine **sxpar** allows then to access each parameter, e.g. :

number of elementary accumulations

per spectrum = **sxpar(header,'ACC')** [long]

spectrum duration (msec) = **sxpar(header,'DT')** [float]

start time = **sxpar(header,'TIME-OBS')** [string]

end time = **sxpar(header,'TIME-END')** [string]

receiver name = **strcompress(strupcase(sxpar(header,'INSTRUME')))/remove_all)**

To list all parameters, type : **print, header0**

Reading_idl_LSS_fits_files_AC20131206.pdf

Reading the level 1 header and data (SETUP) :

header1 = headfits(file, exten=1)

To list all parameters, type : **print, header1**

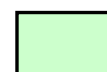
a = mrdfits(file, 1)

Content of structure a : **help,/struct,a**

number of frequencies =	a.nf	[int]
list of frequencies =	a.frq	[float array of dimension (a.nf)]
number of input channels =	a.nbchan	[int]
list of correlations computed =	a.chan	[int array of dimension (a.nbchan, 2)]

Data of channel k consists of the correlation of antennas a.chan[k,0] and a.chan[k,1]

a.chan		MR 1		MR 2		MR 3	
		NW	NE	NW	NE	NW	NE
MR 1	north-west	[0,0]	[1,0]	[2,0]	[3,0]	[4,0]	[5,0]
	north-east	[0,1]	[1,1]	[2,1]	[3,1]	[4,1]	[5,1]
MR 2	north-west	[0,2]	[1,2]	[2,2]	[3,2]	[4,2]	[5,2]
	north-east	[0,3]	[1,3]	[2,3]	[3,3]	[4,3]	[5,3]
MR 3	north-west	[0,4]	[1,4]	[2,4]	[3,4]	[4,4]	[5,4]
	north-east	[0,5]	[1,5]	[2,5]	[3,5]	[4,5]	[5,5]



Real part of a cross-correlation



Imaginary part of a cross-correlation



Auto-correlation

- Interférométrie & Polarimétrie : imagerie radio & paramètres de Stokes

→ The « Measurement Equation of a radio interferometer »

Relation mesures ↔ Observables

Equation explicite reliant les mesures interférométriques à S,Q,U,V

dérivées par (Morris & al. ApJ, 139, p. 551, 1964)

Cadre mathématique + général proposé par Hamaker et al. (*A&A Supp.*, 117, 137, 1996)

Hypothèse de base: linéarité des effets dus à la propagation & au récepteur.

$$\mathbf{E} = (E_x, E_y) \Rightarrow \mathbf{E}' = [\mathbf{J}] \mathbf{E} \quad (\text{propagation})$$

$$\mathbf{V} = [\mathbf{J}] \mathbf{E} \quad (\text{réception, avec } \mathbf{V} = (V_x, V_y))$$

$[\mathbf{J}]$ (ou \mathbf{J}) est une matrice 2×2, appelée « matrice de Jones »

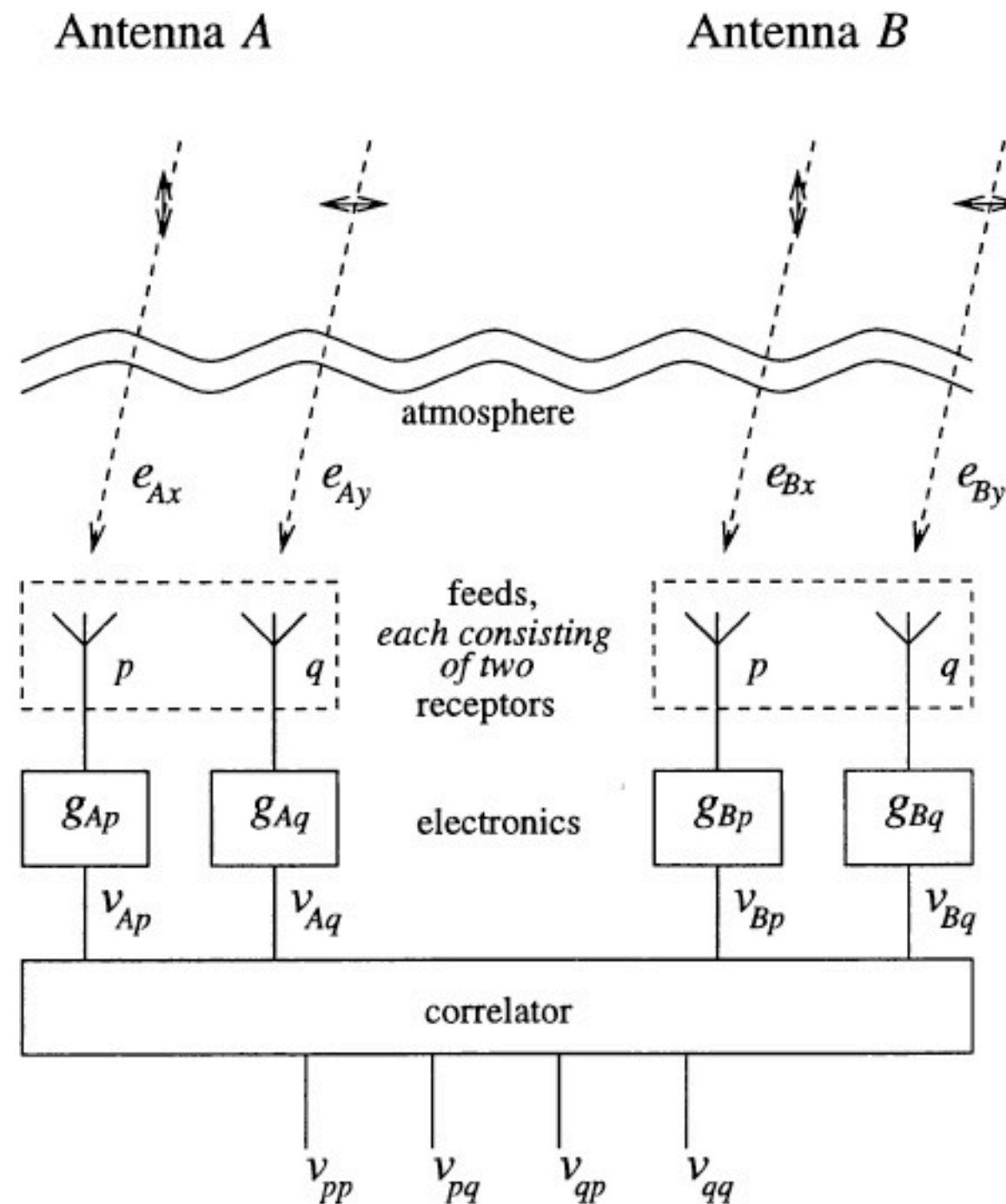
Antenne unique : $\mathbf{V} = \mathbf{J} \mathbf{E} = (V_x, V_y)$ = voltages complexes (amplitude & phase) mesurés par chaque élément focal polarisé (linéairement), d'où on peut tirer la « matrice de cohérence » :

$$\langle \mathbf{V}^t \mathbf{V}^* \rangle |_{\Delta t} \gg 1/v = \begin{bmatrix} \langle V_x V_x^* \rangle & \langle V_x V_y^* \rangle \\ \langle V_y V_x^* \rangle & \langle V_y V_y^* \rangle \end{bmatrix}$$

$$\propto \begin{bmatrix} \langle E_x E_x^* \rangle & \langle E_x E_y^* \rangle \\ \langle E_y E_x^* \rangle & \langle E_y E_y^* \rangle \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} S+Q & U+iV \\ U-iV & S-Q \end{bmatrix} = \mathbf{B}$$

Interféromètre : $\mathbf{V}_i = \mathbf{J}_i \mathbf{E}$ pour chaque élément de l'interféromètre, d'où on définit la « matrice de visibilité », qui rassemble les mesures d'un interféromètre :

$$\langle \mathbf{V}_p^t \mathbf{V}_q^* \rangle |_{\Delta t} \gg 1/\nu = \begin{bmatrix} \langle V_{px} V_{qx}^* \rangle & \langle V_{px} V_{qy}^* \rangle \\ \langle V_{py} V_{qx}^* \rangle & \langle V_{py} V_{qy}^* \rangle \end{bmatrix} = \mathbf{V}_{pq}$$



Interferometer block diagram

Pour un champ électrique incident \mathbf{E} provenant d'une source ponctuelle, les antennes p & q mesurent : $\mathbf{V}_p = \mathbf{J}_p \mathbf{E}$ & $\mathbf{V}_q = \mathbf{J}_q \mathbf{E}$
 où \mathbf{J}_p & \mathbf{J}_q sont les matrices de Jones décrivant les transformations du signal entre la source et les récepteurs

$$\Rightarrow \mathbf{V}_{pq} = \langle \mathbf{V}_p {}^t\mathbf{V}_q^* \rangle = \langle \mathbf{J}_p \mathbf{E} {}^t(\mathbf{J}_q \mathbf{E})^* \rangle$$

avec ${}^t(AB) = {}^tB {}^tA$ et en supposant que \mathbf{J}_p & \mathbf{J}_q sont constantes sur $\langle \dots \rangle$

$$\Rightarrow \mathbf{V}_{pq} = \mathbf{J}_p \langle \mathbf{E} {}^t\mathbf{E}^* \rangle {}^t\mathbf{J}_q^* = \mathbf{J}_p \mathbf{B} {}^t\mathbf{J}_q^*$$

= « **Measurement Equation** » (Équation des Mesures)

(peut aussi être écrite en polarisations circulaires)

Si on décompose les transformations du signal dues à la propagation & au récepteur en produit (non commutatif) de n matrices de Jones, e.g. : $\mathbf{J}_p = \mathbf{J}_{pn} \mathbf{J}_{p(n-1)} \dots \mathbf{J}_{p1}$

d'où $\mathbf{V}_{pq} = \mathbf{J}_{pn} \mathbf{J}_{p(n-1)} \dots \mathbf{J}_{p1} \mathbf{B} {}^t\mathbf{J}_{q1}^* {}^t\mathbf{J}_{q2}^* \dots {}^t\mathbf{J}_{qm}^*$

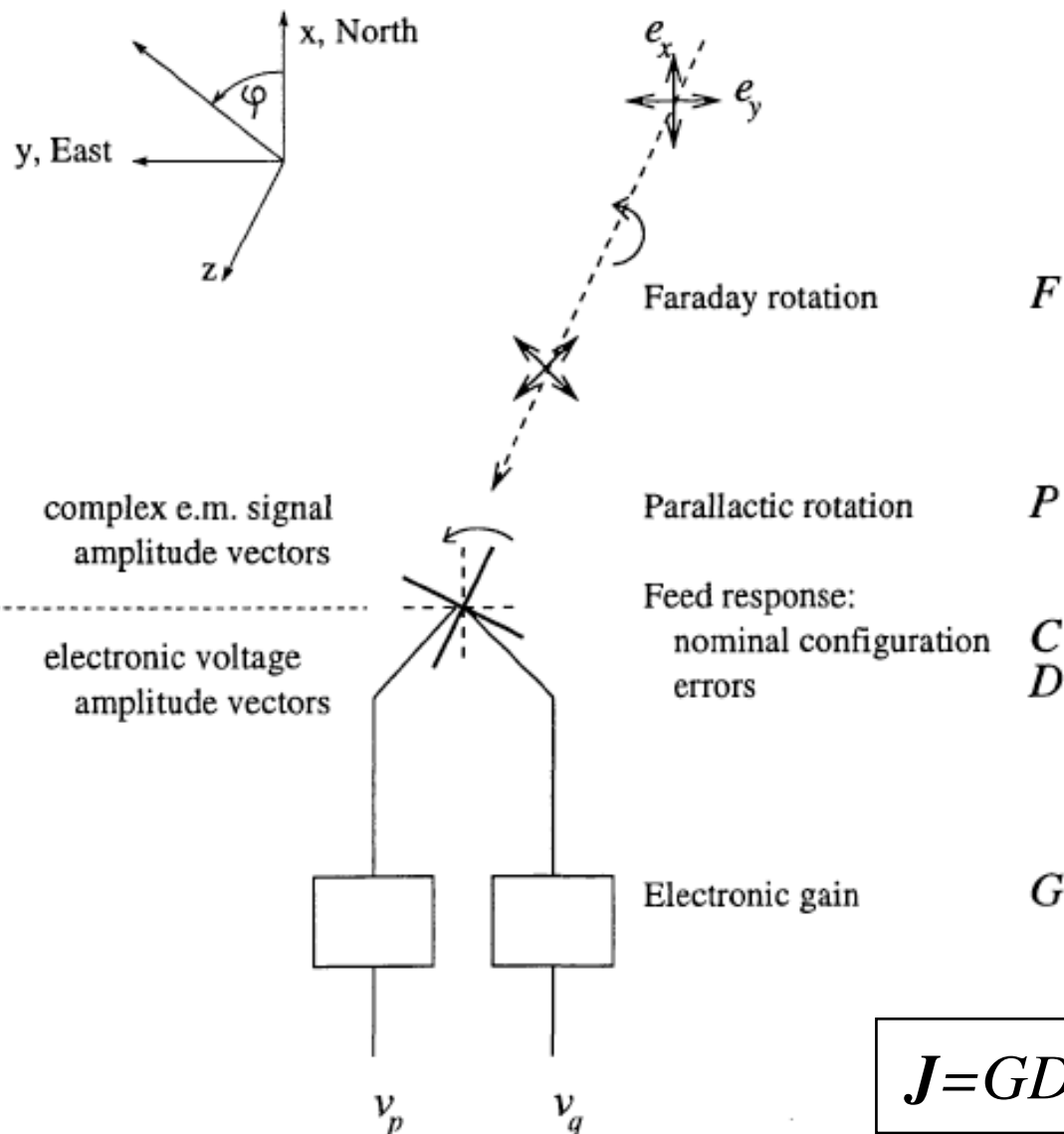
Les termes $J_{p,q}$ peuvent contenir toutes les transformations subies par le signal:

- gain de l'antenne et du récepteur : $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_x & 0 \\ 0 & G_y \end{bmatrix}$

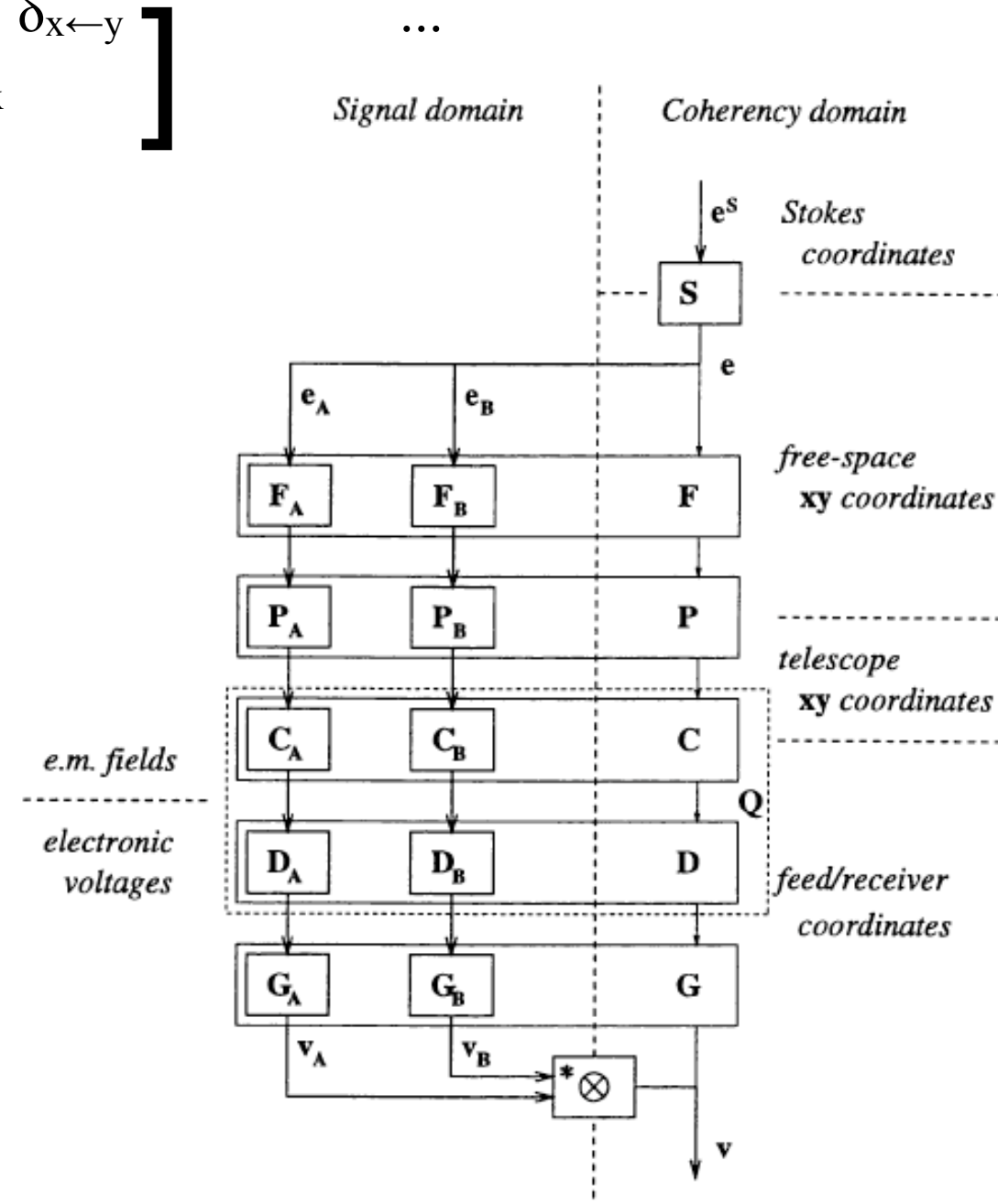
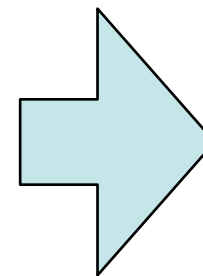
- déphasages : $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} e^{i\psi} & 0 \\ 0 & e^{i\psi} \end{bmatrix}$

- rotations (des dipôles, Faraday...): $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix}$

- termes de polarisation croisée (erreurs) : $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & \delta_{x \leftarrow y} \\ -\delta_{y \leftarrow x} & \end{bmatrix}$



$$\mathbf{J} = \mathbf{GDCPF}$$



Modélisation d'un interféromètre radio = détermination des matrices de Jones qui le décrivent

Packages dédiés à un type d'instrument: AIPS, AIPS++, CASA ...

Package générique: MeqTrees (<http://ska-sa.github.io/meqtrees/>)

Exemples :

- Observation d'une source ponctuelle avec un instrument parfait :

$$\mathbf{V}_{pq} = \mathbf{D}_p \mathbf{B}^t \mathbf{D}_q^*$$

avec D la matrice de Jones scalaire représentant le déphasage dû à la différence de marche:

$$\psi = 2\pi d \sin\theta / \lambda$$

$$\Rightarrow \psi_{pq} = 2\pi \mathbf{u}_{pq} \cdot \mathbf{k} = 2\pi (\mathbf{u}_q - \mathbf{u}_p) \cdot \mathbf{k} = \psi_q - \psi_p$$

$$\text{Cas scalaire : } V_{pq} = e^{i\psi_{pq}} \Rightarrow S V_{pq} = e^{i\psi_q} S e^{-i\psi_p}$$

$$\begin{aligned} \text{M.E. : } \quad \mathbf{V}_{pq} &= \mathbf{D}_p \mathbf{B}^t \mathbf{D}_q^* \\ \langle V_{px} V_{qx}^* \rangle &= e^{i\psi_q} \frac{1}{2} (S+Q) e^{-i\psi_p} \end{aligned}$$

- Pour une source quelconque (étendue) \Rightarrow décomposition en sources ponctuelles élémentaires :

$$\mathbf{V}_{pq} = \sum_s (\mathbf{D}_p \mathbf{B}^t \mathbf{D}_q^*)$$

\Rightarrow tous les résultats obtenus pour S en imagerie d'une source quelconque s'appliquent aux éléments de \mathbf{B} , ou de manière équivalente aux paramètres de Stokes S, Q, U, V

Reading_idl_LSS_fits_files_AC20131206.pdf

Reading the level 2 header and data (DATA CUBE) :

header2 = headfits(file, exten=2)

To list all parameters, type : **print, header2**

Total number of spectra in file is given by : **ns=sxpar(header2,'NAXIS2')**

Reading data cube from spectrum ns_begin to spectrum ns_end (included) :

cube=mrdfits(file, 2, range=[ns_begin,ns_end])

Size of structure cube : **help,cube**

Content of structure cube[i] : **help,/struct,cube**

julian date (0.1 msec accuracy)	cube[i].jd	[double]
millisecond (within current sec)	cube[i].msec	[double]
data	cube[i].data	[float array of dimension (a.nf, a.nbchan)]

To decode time, use the routine **CALDAT**:

CALDAT,cube[i].jd, month,day,year,hour,minute,second

cube[i].msec is included in the decimal part of second

```
IDL> file='/Users/pz/Mes_Documents/NenuFAR/Test_MR/Tests-MR-LaMiRe/20140516_112007/  
LSS_1088_20140516_112007.fits'
```

```
IDL> header0 = headfits(file, exten=0) ; PRIMARY
```

```
% Compiled module: HEADFITS.
```

```
% Compiled module: FXPOSIT.
```

```
% Compiled module: MRD_HREAD.
```

```
IDL> print, header0
```

```
SIMPLE   =          T / Standard FITS  
BITPIX   =        -32 / bits per Data value  
NAXIS    =          0 / No Data follow the header  
EXTEND    =          T / File may contain extensions  
DATE-CRE= '2014-05-18' / Date of file creation  
DATE-OBS= '2014-05-16' / Begin date of observation  
DATE-END= '2014-05-18' / End date of observation  
TIME-OBS= '11:20:09.619' / Begin time observation  
TIME-END= '11:20:10.100' / End time observation  
TIME-SYS= 'UTC' / System Time observation  
FRQRANGE= '[10.01 MHz, 87.99 MHz]' / Frequency range  
DT        =        999.994 /rate in milliseconds  
ACC        =        48828 /Integration factor  
CONTACT   = ' L.Denis' /  
ORIGIN    = 'NANCAY OBSERVATORY FRANCE ' /  
INSTRUME= ' LSS' / Instrument used to acquire the data  
TELESCOP= ' Phased Array' / Telescope type  
OBS-TYPE= ' RADIO' /  
OBJECT    = ' Unknown' /  
END
```

```

IDL> header1 = headfits(file, exten=1) ; SETUP
% Compiled module: FXMOVE.
% Compiled module: FXPAR.
% Compiled module: GETTOK.
% Compiled module: VALID_NUM.
% Compiled module: MRD_SKIP.
IDL> print,header1
XTENSION= 'BINTABLE'          / Frequencies, channels arrays
BITPIX   =          -32 / Floating point data
NAXIS    =           2 / Number of axes
EXTNAME  = 'SETUP'         / Extension name
NAXIS1   =        6528 / 8-bits bytes number per row
NAXIS2   =           1 / only one row
PCOUNT   =           0 /
GCOUNT   =           1 /
TFIELDS  =           4 / Number of Fields
TFORM1   = '1I'           / Field1: 16 bits integer
TTYPE1   = 'nf'           / Field1: Frequencies number
TFORM2   = ' 1598E'       / Field2: Single precision floating point
TTYPE2   = 'frq'          / Field2: Frequencies table
TUNIT2   = 'MHz'          / Field2: unit
TFORM3   = '1I'           / Field3: : 16 bits integer
TTYPE3   = 'nbchan'       / Field3: Channels number
TFORM4   = ' 32I'         / Field4: 16 bits integer
TTYPE4   = 'chan'         / Field4: Channels table
TDIM4    = '( 16,2)'      /
END

```

```

IDL> a=mrdfits(file, 1)
% Compiled module: MRDFITS.
% Compiled module: MATCH.
% Compiled module: MRD_STRUCT.
MRDFITS: Binary table.  4 columns by  1 rows.
% Compiled module: IS_IEEE_BIG.
IDL> ;MRDFITS: Binary table.  4 columns by  1 rows.
IDL> help,/struct,a
** Structure <16614d8>, 4 tags, length=6464, data length=6460, refs=1:
    NF          INT          1598
    FRQ         FLOAT       Array[1598]
    NBCHAN      INT          16
    CHAN        INT        Array[16, 2]
IDL> print,a.frq
    10.0098      10.0586      10.1074      10.1562      10.2051      10.2539      10.3027
    .....
    87.9395      87.9883
IDL> for i=0,15 do print,i,a.chan(i,0),a.chan(i,1)
    0           2           2
    1           3           2
    2           4           2
    3           5           2
    4           2           3
    5           3           3
    6           4           3
    7           5           3
    8           2           4
    9           3           4
    10          4           4
    11          5           4
    12          2           5
    13          3           5
    14          4           5
    15          5           5

```



```

IDL> header2 = headfits(file, exten=2) ; DATA CUBE
IDL> print,header2
XTENSION= 'BINTABLE'          / DATA CUBE EXTENSION
BITPIX   =                    -32 / array of Floats (32 bits)
NAXIS    =                      2 / Data
EXTNAME  = 'DATACUBE'         /
NAXIS1   =                    102288 / Number of 8-bit bytes in each row
NAXIS2   =                    172800 / Number of rows
TFIELDS  =                      3 / Fields number
TFORM1   = 'D'                / Field1: Double precision floating point
TTYPE1   = 'JD'               / Field1: julian date
TFORM2   = 'D'                / Field2: Double precision floating point
TTYPE2   = 'MSEC'             / Field2: Milliseconds to add to julian date
TFORM3   = ' 25568E'          /Field3: Single precision floating point
TTYPE3   = 'DATA'             /Field3: Data
TDIM3    = '( 1598, 16)'      /
TUNIT3   = '/acc'             / Field3:data are normalized
END

```

```

IDL> ns=sxpar(header2,'NAXIS2') ; NUMBER OF SPECTRA IN FILE
IDL> help,ns
NS                LONG      =      172800
IDL> cube=mrdfits(file, 2, range=[0,999]) ; READING FIRST 1000 SPECTRA
MRDFITS: Binary table. 3 columns by 1000 rows.
IDL> help,cube
CUBE              STRUCT    = -> <Anonymous> Array[1000]
IDL> help,/struct,cube
** Structure <2103bb8>, 3 tags, length=102288, data length=102288, refs=1:
    JD            DOUBLE      2456794.0
    MSEC          DOUBLE      619.52555
    DATA         FLOAT       Array[1598, 16]

```

reduce_fits_to_sav.pro

```
;-----  
  pro REDUCE_FITS_TO_SAV, file, rt, rf, MEDIAN=MEDIAN, RAW=RAW, VISIBILITY=VISIBILITY,  
  VERBOSE=VERBOSE  
;-----  
; e.g. file='LSS_1088_20140516_112007'  
; rt, rf = reduction factors / time (spectra) & frequencies  
; default reduction = Average, MEDIAN if specified  
; /RAW --> saves raw data x  
; /VISIBILITY --> computes and saves v  
  
...  
  
if keyword_set(MEDIAN) then filesav=filesav+'-M'  
if keyword_set(RAW) then save,x,f,t,c,nf,nt,nc,rt,rf,file=filesav+'_R.sav'  
if keyword_set(VISIBILITY) then CHAN_TO_VIS, c, x, v, nv, cv  
                                save,v,f,t,c,nf,nt,nc,nv,rt,rf,cv,file=filesav+'_V.sav'
```

LSS_1088_20140516_112007-10-2_R.sav

LSS_1088_20140516_112007-10-2-M_R.sav

chan_to_vis.pro

```
;-----  
;  pro CHAN_TO_VIS, c, x, v, nv, cv  
;-----  
;  c(nc,2) = channel organisation  
;  x(nt,nf,nc) = input array  
;  v(nt,nf,2,2,nv) = output array  
;  cv = MR names
```

LSS_1088_20140516_112007-10-2_V.sav

LSS_1088_20140516_112007-10-2-M_V.sav

plot_raw.pro

```
;-----  
  pro PLOT_RAW, filesav, VERBOSE=VERBOSE  
;-----  
; e.g. filesav='LSS_1088_20140516_112007-10-2[-M]_R'
```

plot_vis.pro

```
;-----  
  pro PLOT_VIS, filesav, VERBOSE=VERBOSE  
;-----  
; e.g. filesav='LSS_1088_20140516_112007-10-2[-M]_V'
```

```
IDL> file='/Users/pz/Mes_Documents/NenuFAR/Test_MR/Tests-MR-LaMiRe/  
20140516_112007/LSS_1088_20140516_112007.fits'  
IDL> REDUCE_FITS_TO_SAV, file, 60, 4, /MEDIAN, /RAW, /VIS, /VERB
```

LSS_1088_20140516_112007-60-4-M_R.sav

LSS_1088_20140516_112007-60-4-M_V.sav

```
IDL> filesav='/Users/pz/Mes_Documents/NenuFAR/Test_MR/Tests-MR-LaMiRe/  
20140516_112007/LSS_1088_20140516_112007-60-4-M_R.sav'  
IDL> PLOT_RAW, filesav, /VERB
```

LSS_1088_20140516_112007-60-4-M_R.ps → .pdf

```
IDL> filesav='/Users/pz/Mes_Documents/NenuFAR/Test_MR/Tests-MR-LaMiRe/  
20140516_112007/LSS_1088_20140516_112007-60-4-M_V.sav'  
IDL> PLOT_VIS, filesav, /VERB
```

LSS_1088_20140516_112007-60-4-M_V.ps → .pdf

