

Traitements GNSS pour la Géodésie: progrès récents , limites et questions en

Les mesures GNSS, présentes depuis près de trois décennies, servent aujourd'hui tous les aspects de la Géodésie : rotation terrestre / syst. de référence / transfert de temps / positionnement (LEOs / récepteurs géodésiques terrestres / ...). Utilisées massivement elles sont devenues indispensables à de nombreuses études et des applications variées. Elles sont à la base de systèmes d'observations scientifiques de plus en plus nombreux. Les progrès des mesures, des modèles et des méthodes de traitement ont été spectaculaires et permettent aujourd'hui de disposer de suivis millimétriques des observables fondamentaux de la géodésie. Nous rappellerons les progrès les plus récents et les travaux en cours au sein de l'International GNSS Service (produits entiers / multi-GNSS / REPRO3...) Nous insisterons sur les questions posées aujourd'hui dans ce domaine en pointant quelques-unes des limites actuelles des traitements, des modèles et des méthodes; limites qui affectent la détermination des produits orbites des horloges des eop et des séries temporelles de coordonnées et leur interprétation.

Traitements GNSS pour la Géodésie: progrès, questions en cours

SYLVAIN LOYER

CA CNES/CLS (GRG/GRM):

ADRIEN MEZERETTE

FELIX PEROSANZ

ALVARO SANTAMARIA

FLAVIEN MERCIER

PRN	25431	25432	25433	25434	25435	25436	25437
E01	3	3	3	2	3	3	3
E02	4	3	2	3	3	2	2
E03	7	7	4	2	2	3	3
E04	4	4	2	2	2	4	4
E05	3	3	3	3	5	6	6
E07	4	2	3	3	3	4	5
E08	4	4	4	5	5	4	3
E09	3	5	5	4	4	4	3
E11	3	5	5	3	2	5	7
E12	3	3	2	2	2	3	3
E13	2	2	2	2	2	2	4
E14	4	4	3	5	4	4	7
E15	3	3	2	2	3	2	3
E18	6	4	2	2	3	4	4
E19	5	5	4	5	5	5	5
E21	4	4	3	2	2	3	3
E24	4	4	2	2	2	2	2
E25	3	3	2	3	2	2	4
E26	3	3	1	1	2	2	2
E27	5	5	3	3	2	2	3
E30	3	2	3	3	3	3	3
E31	3	3	2	2	3	3	2

PRN	25431	25432	25433	25434	25435	25436	25437
R01	6 E	5 E	5 E	7 E	7 E	6 E	7 E
R02	4 E	3 E	2 E	2 E	3 E	4 E	3 E
R03	6 E	5 E	3 E	3 E	3 E	3 E	4 E
R04	5 E	5 E	4 E	4 E	4 E	3 E	4 E
R05	5 E	6 E	4 E	2 E	3 E	4 E	4 E
R07	5 E	5 E	2 E	2 E	3 E	3 E	4 E
R08	6 E	4 E	3 E	4 E	4 E	3 E	4 E
R09	3	3	3	3	2	3	4
R11	3	3	3	3	2	2	4
R12	3	4	3	4	5	4	4
R13	3	4	3	2	4	4	3
R14	4	3	2	3	3	2	3
R15	3	3	4	3	3	4	3
R16	5	5	6	6	5	6	6
R17	5	4	2	2	2	2	3
R18	5	5	3	3	4	3	4
R19	5	5	4	4	5	5	5
R20	3	4	4	6	7	8	7
R21	2	4	3	0	3	4	4
R22	3	2	3	4	4	5	5

PRN	25431	25432	25433	25434	25435	25436	25437
G01	2	2	1	1	2	2	2
G02	2	2	1	1	1	1	2
G03	4 E	3 E	2 E	2 E	2 E	3 E	5 E
G05	5 E	5 E	4 E	4 E	3 E	2 E	3 E
G06	2	2	1	1	2	2	2
G07	2	2	1	1	1	2	4
G08	2	2	1	1	1	2	2
G09	3	2	2	2	2	2	2
G10	4 E	4 E	3 E	3 E	3 E	2 E	2 E
G11	2	2	1	1	1	2	2
G12	2	2	3	3	2	2	3
G13	5	5	2	2	2	2	3
G14	2	2	2	1	1	2	2
G15	5	4	2	1	2	2	2
G16	2	2	2	6	6	3	3
G17	2	2	2	2	2	2	3
G18	2	2	1	1	1	1	2
G19	3	2	1	1	2	2	3
G20	4 E	3 E	2 E	5	5	3	3
G21	2	2	2	2	2	2	3
G22	3 E	3 E	2 E	2 E	2 E	4 E	6 E
G23	2	2	2	2	2	2	2
G24	3	2	1	1	2	2	2
G25	3	2	1	2	2	2	2
G26	3	3	2	2	3	3	3
G27	3	3	1	1	1	2	2
G28	3	3	1	1	2	2	2
G29	4	3	2	2	2	2	2
G30	4	3	3	2	2	2	2
G31	2	2	1	1	1	1	2
G32	2	2	1	1	2	2	2

Overlaps (RMS3D cm) semaine du 18 au 24/08



I. Du neuf en GNSS ?

I. GNSS : Quelles constellations ? Statut CA & IGS / en pratique

II. Multi GNSS , IGS & produits entiers: Des innovations qui arrivent sur les étagères
Galileo aussi bon que GPS ? : Applications & PPP/IPPP Galileo... cf. Felix

II. Limites/défauts et Questions actuelles

GNSS : LES CONSTELLATIONS

Le CA CNES CLS traite aujourd'hui les trois constellations GPS/GLONASS et GALILEO sur les 7 « connues » de GNSS. GPS et Glonass sont officielles « IGS », les autres sont en cours d'intégration dans le cadre de MGEX (Galileo , Beidou, ...)

IGS
INTERNATIONAL
GNSS SERVICE



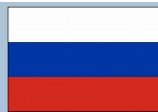
GPS



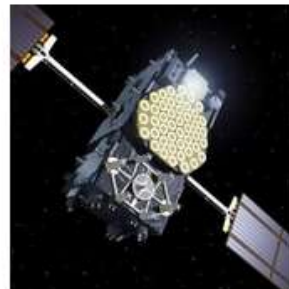
MGEX
GPS



GLONASS



IGS
INTERNATIONAL
GNSS SERVICE



Galileo



MGEX
GPS



BeiDou



MGEX
GPS



QZSS



MGEX
GPS



NAVIC



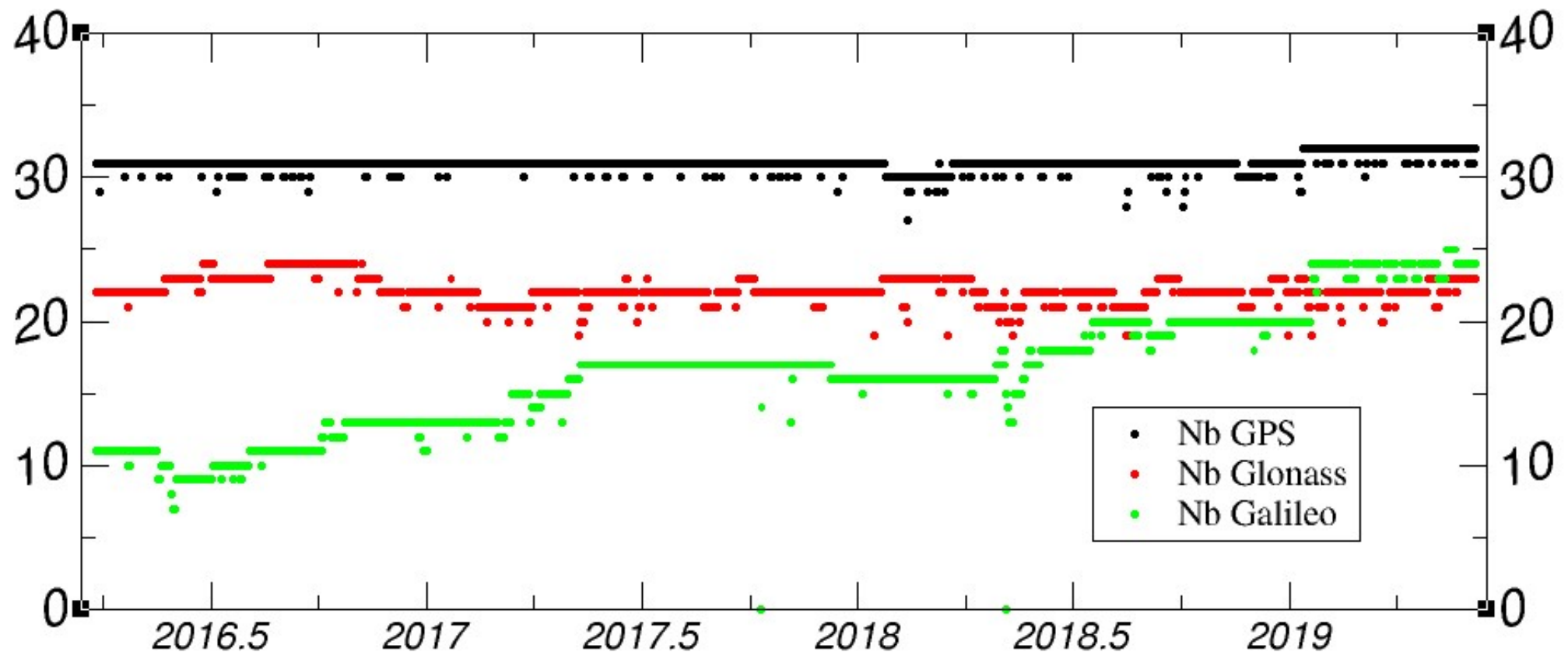
SBAS

Satellite Based
Augmentation
Systems



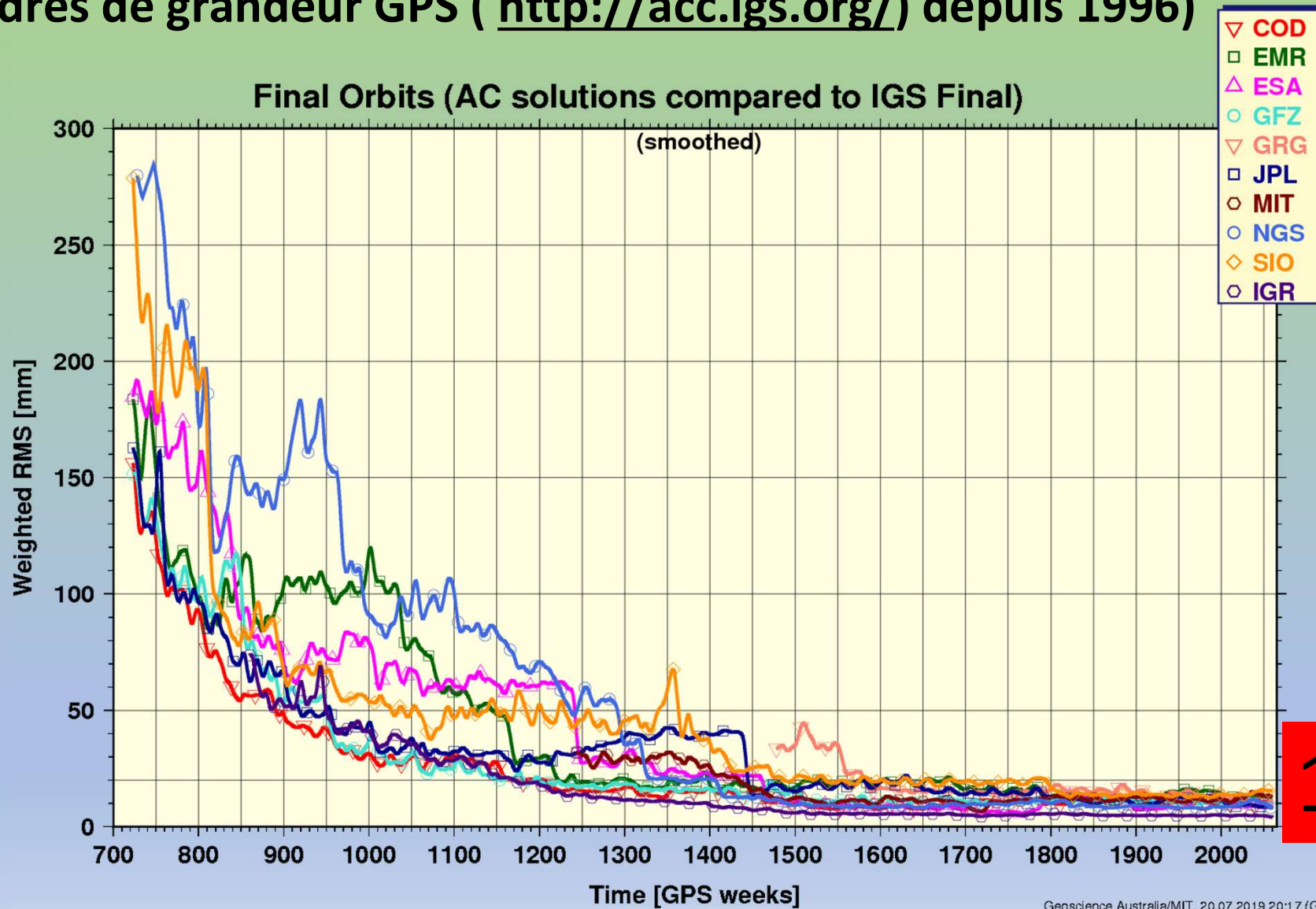
- European Geostationary Navigation Overlay Service ([EGNOS](#))
- GPS Aided Geo Augmented Navigation (GAGAN)
- Geoscience Australia (SBAS) Test-Bed Project ([GATBP](#))
- Multi-functional Satellite Augmentation System (MSAS)
- Nigerian Satellite Augmentation System (NSAS)
- Quasi-Zenith Satellite System ([QZSS](#))
- System for Differential Corrections and Monitoring ([SDCM](#))
- Wide Area Augmentation System ([WAAS](#))

Satellites du CA (3 constellations ~80 satellites)

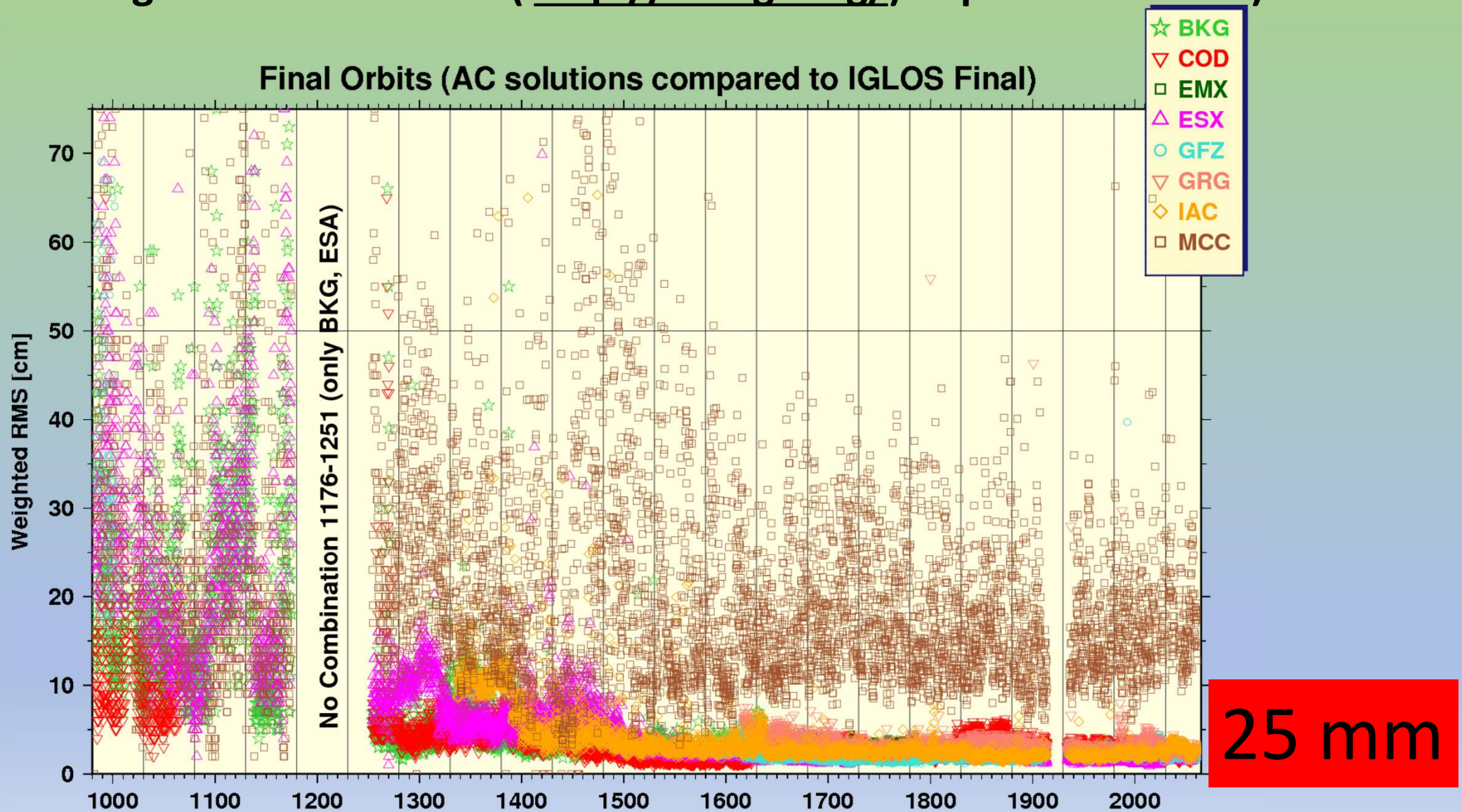


Galileo , présents depuis 2012 (IOV) mais en pratique intérêt à partir de 2017 (> 10 satellites)

Ordres de grandeur GPS (<http://acc.igs.org/>) depuis 1996)



Ordres de grandeur GLONASS (<http://acc.igs.org/>) depuis 2002-2006)

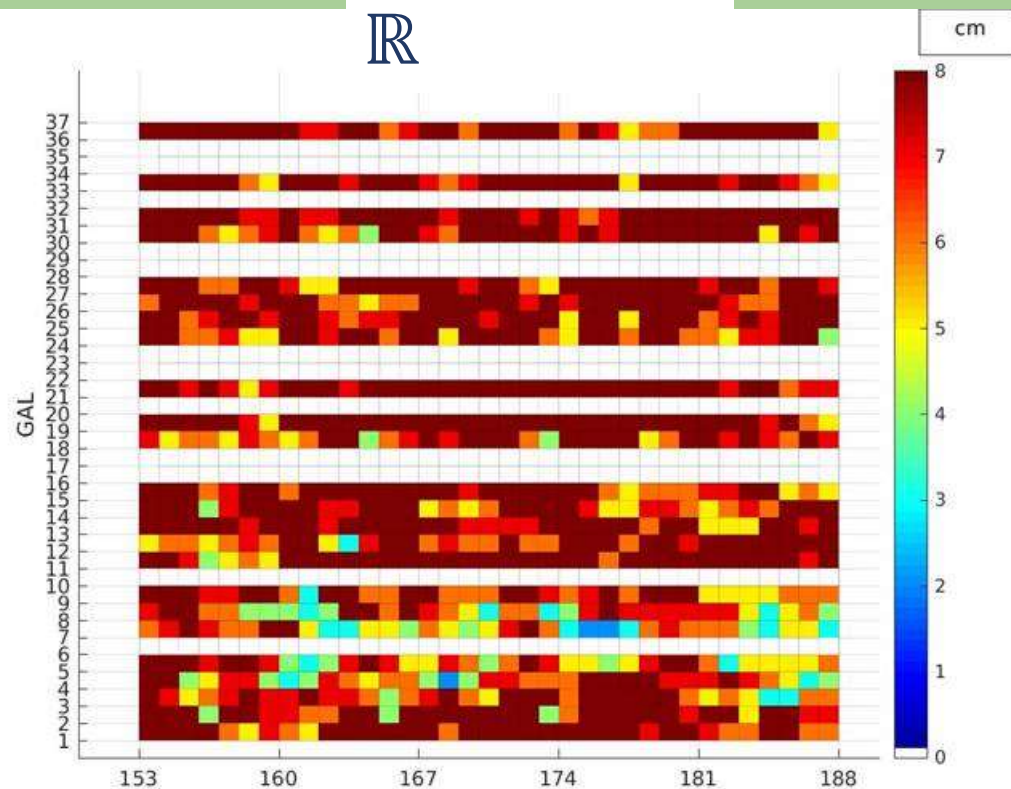


Qualité des orbites Galileo ?

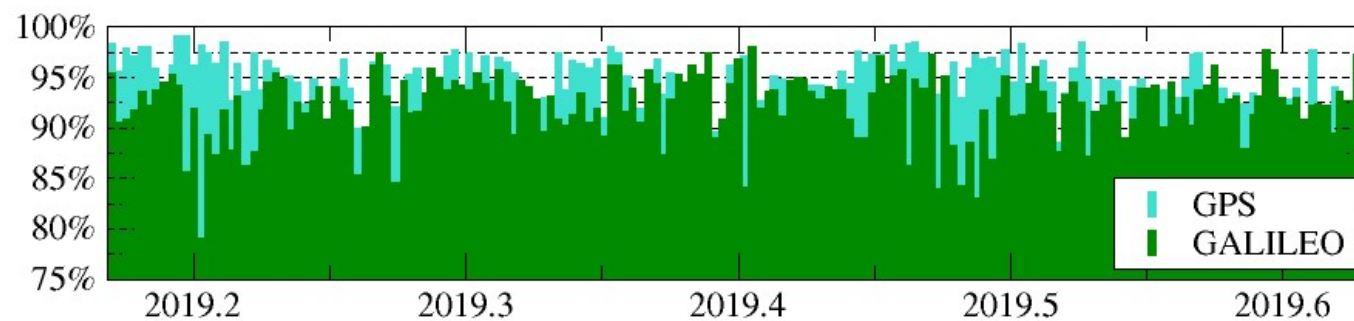
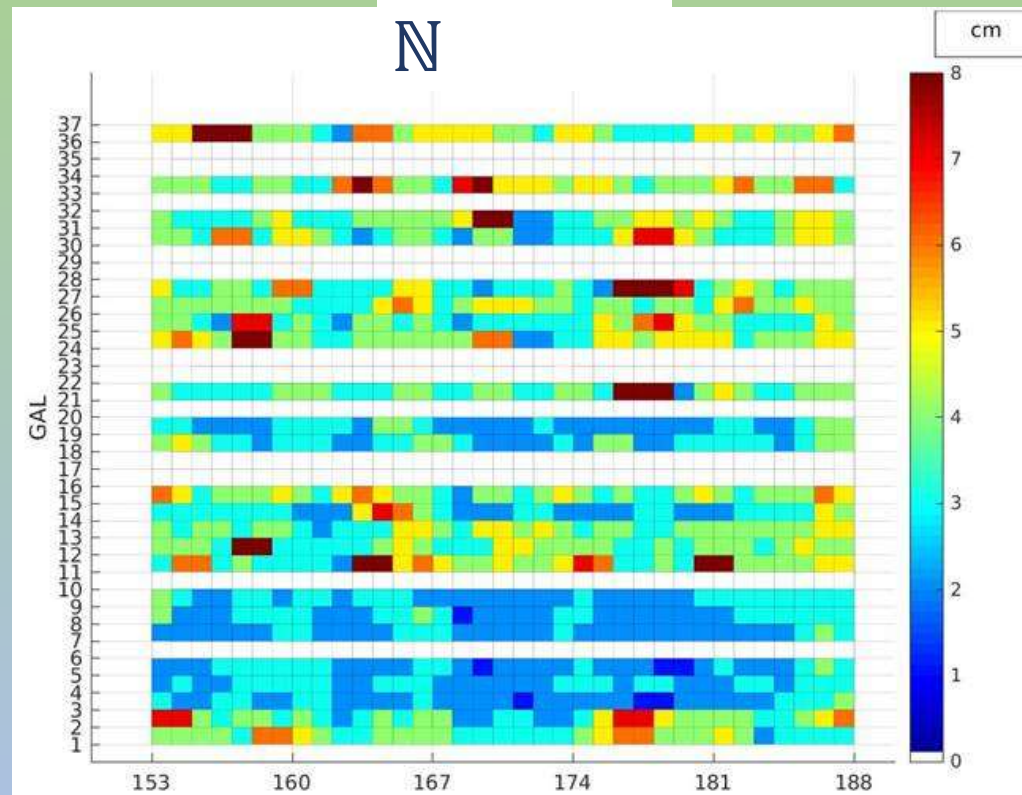
- I. Overlaps
- II. Comparaisons avec autres CAs

Utilité du blocage entier: sur les overlaps GALILEO (Juin 2019)

R



N

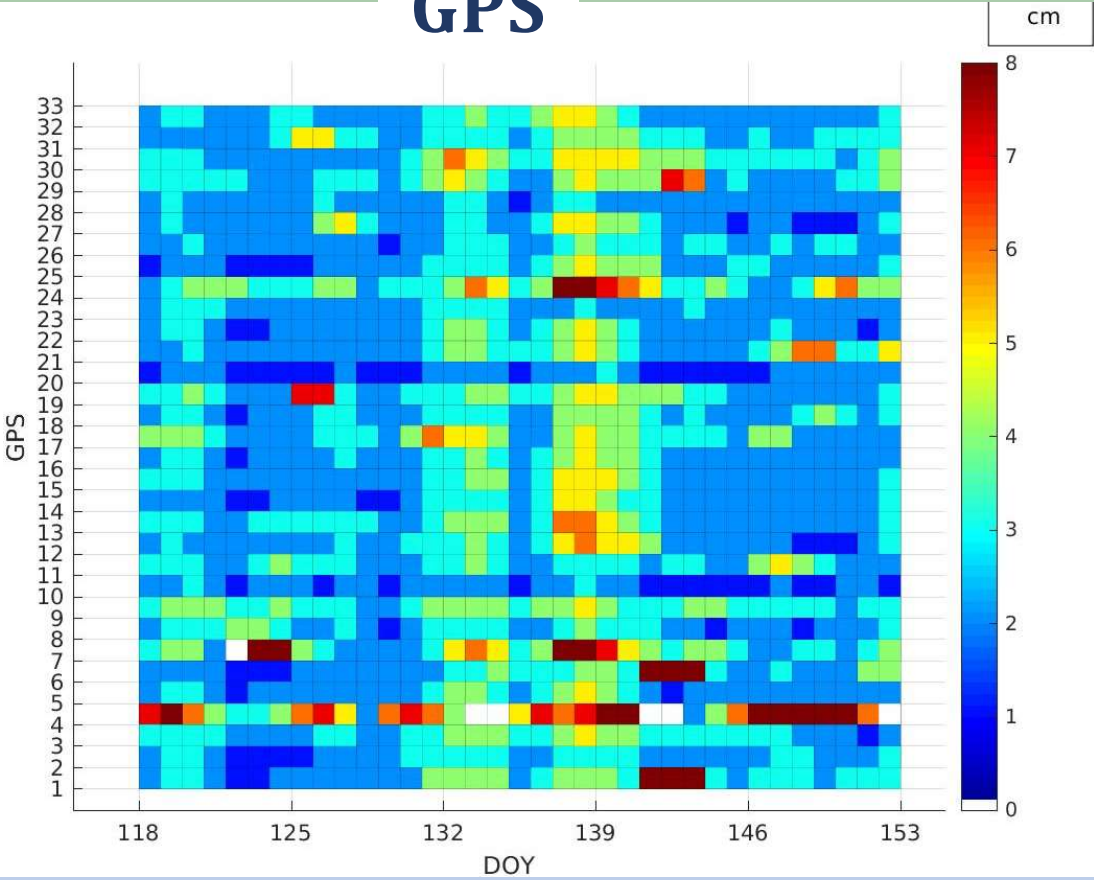


Taux de fixation autour de 90%

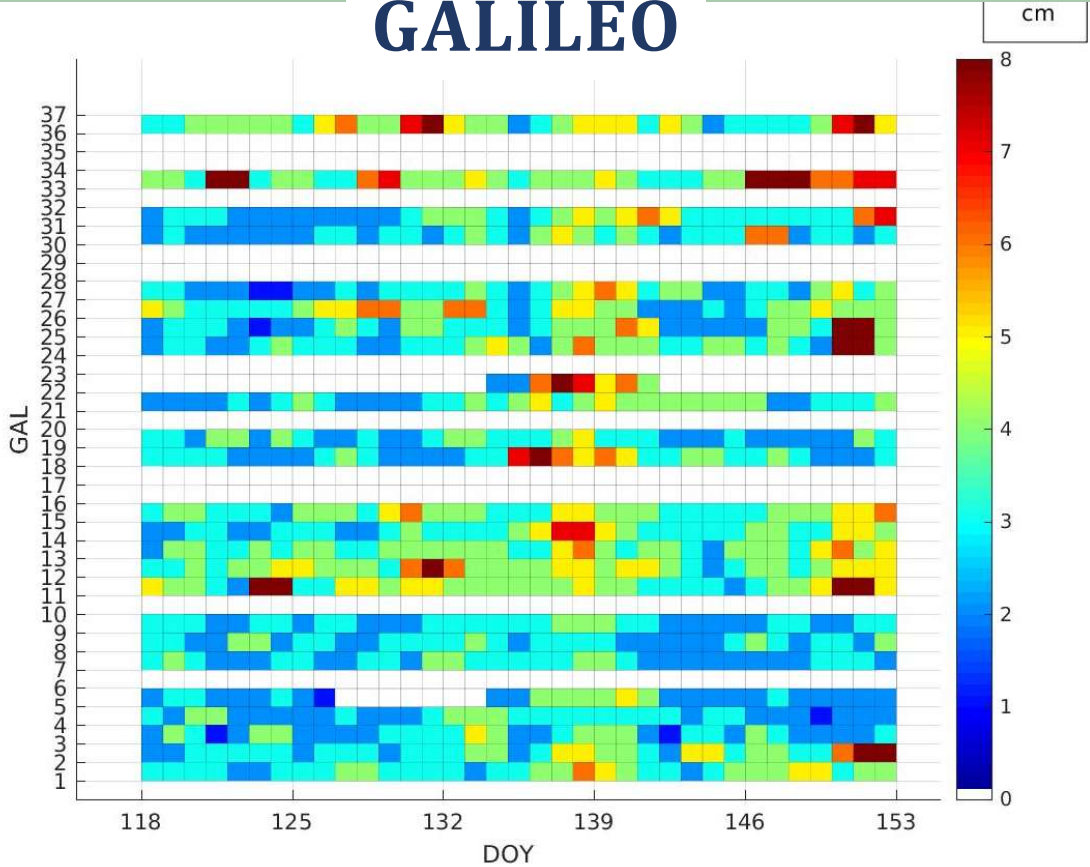
overlaps orbites GALILEO => (~ 1.5 x GPS)

Mai 2019

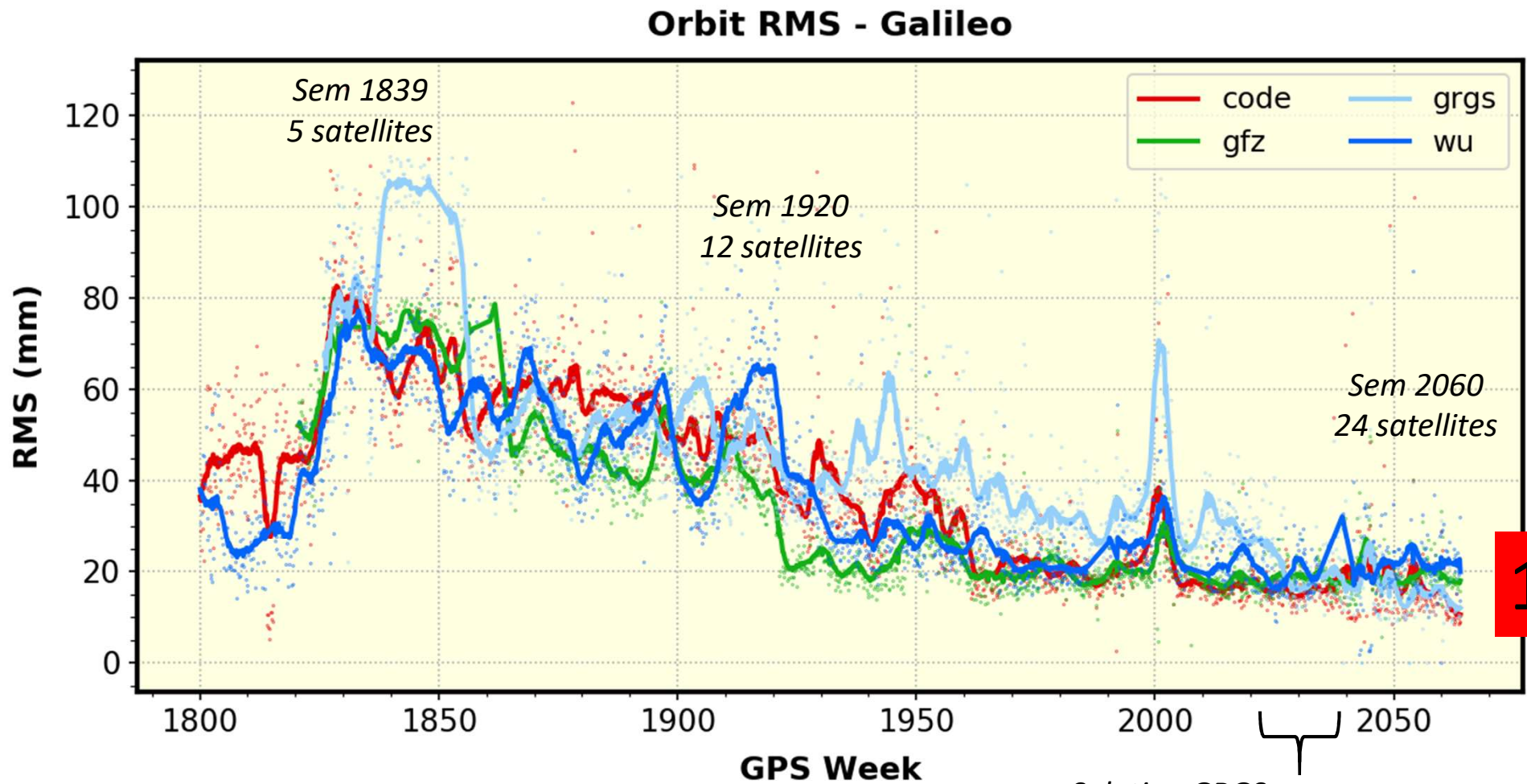
GPS



GALILEO



RMS3D GALILEO ENTRE DIFFERENTS CAs MGEX DEPUIS 2014 (P. Sakic, Comm. Pers)



18 mm

Solution GRGS: passage aux entiers entre semaines 2021 et 2038.

Produit entiers :

- I. Une innovation CNES et CA/GRG depuis 2009.
- II. Un jour à l'IGS ? Cf. Working group PPP-AR visant à combiner les produits entiers des différents CAs.
- III. Fonctionne aussi avec Galileo (Thèse G. Katsigianni et dans les produits Grg/Grm du CA depuis 10/2018)

Des produits entiers « IGS » ?

Main conclusions :

- IPPP (PPP-AR) better in particular in East for every individual solution (here one point per day).
- IGS like combined « GPS integer products » are feasible.
- IPPP with combined products better than individual contributions.
- Gain of few parts of mm
(statistics for 209 globally distributed stations over 7 days)

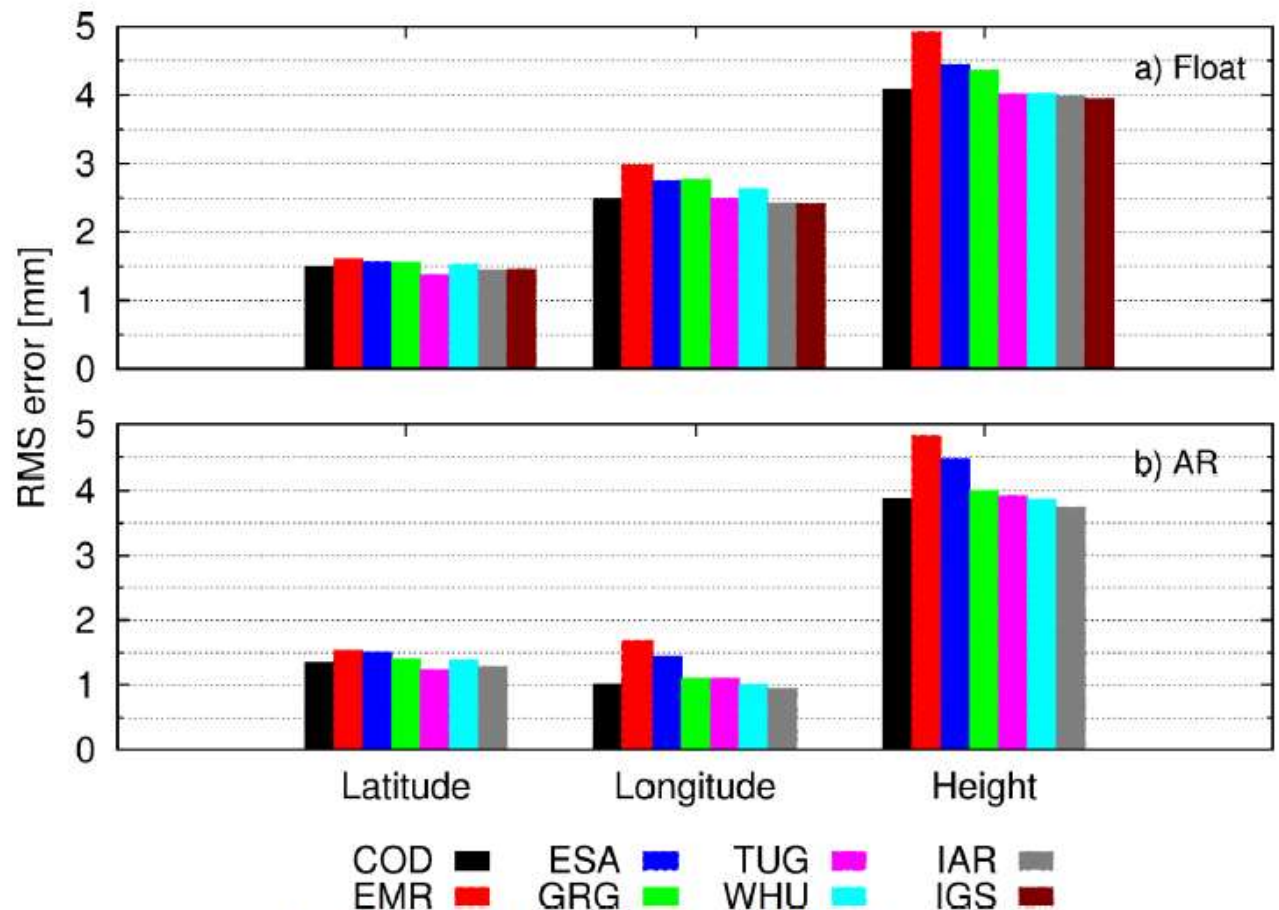


Fig. 8 RMS error of static PPP (float) and PPP-AR solutions

From «**On the interoperability of IGS products for precise point positioning with ambiguity resolution**», draft, Simon Banville & al., IGS/PPP-AR WG 2019, submitted to Journal of Geodesy

L'IGS s'occupe des multi gnss depuis 2012...et aujourd'hui :

- I. GPS utilisé massivement et presque exclusivement
- II. Glonass présent, mais utilisations plus limitées (utile dans les cas dégradés: faible nombre de mesures, masques,..)
- III. Beidou utilisé, en particulier en Asie
- IV. Produits Galileo suffisamment bons pour être utilisés qui arrive au niveau utilisateur (Gins est « prêt », exe_ppp), cf. présentation Felix (Conjointement avec GPS ou seuls).

Sur l'ensemble des applications (PPP-AR ou TF) on attend un impact significatif de Galileo.

- Problèmes restants de compatibilité ? Pondérations?
 - Signaux de bonne (meilleure?) qualité
- Calibration antennes + B&W fournies par l'ESA en 2017!

Quelques (?) problèmes connus (mm) :

Corrections PCO/PCV des antennes :

- Calibrations des antennes sur les nouvelles fréquences
- CDP satellites absolus

Attitude des satellites et Compatibilité des produits :

- Différences d'attitude dans les produits des Acs :
Quelle attitude pour les produits combinés ?

Fixation entière : est elle bonne ? Une mesure de nos erreurs de fixation avec Idefix

Modèles dynamiques , toujours, un fil rouge ...

ANTENNES

Corrections PCO/PCV des antennes des stations GNSS : du mm partout !

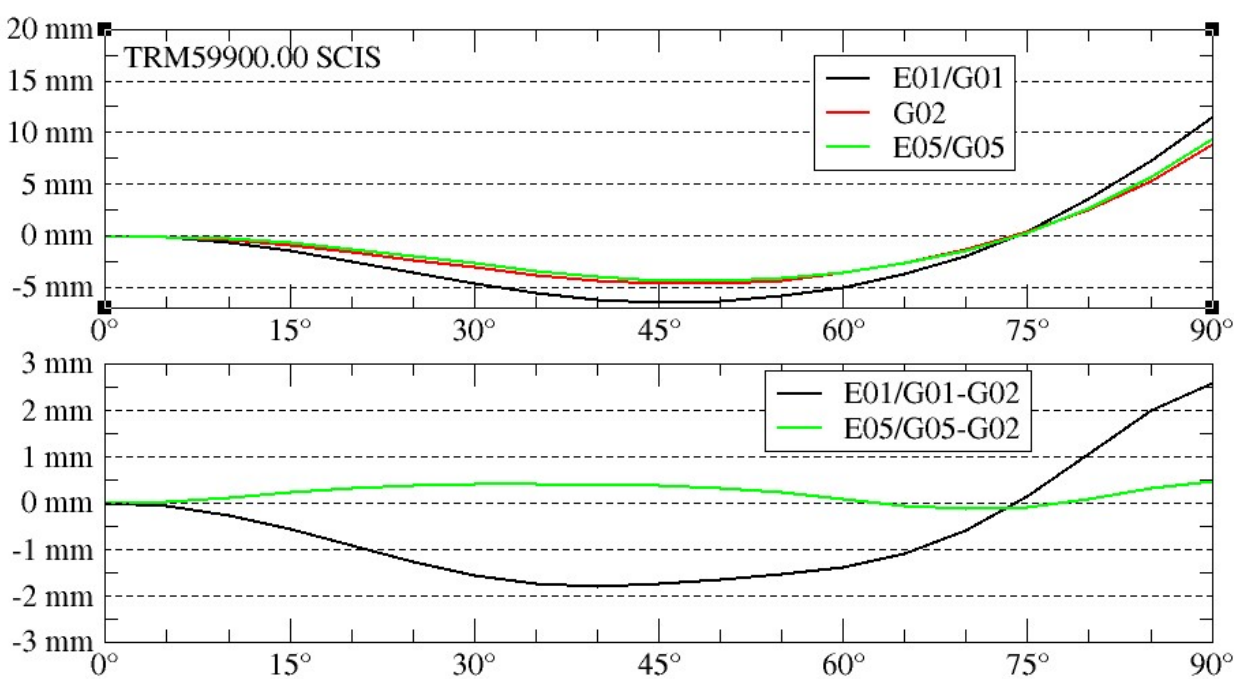
PCO: exemple: TPSCR.G3 NONE

Freq.	PCO (mm) :	ΔN	ΔE	ΔU
G01/E01/J01/S01/C01		-0.34	0.74	85.98
R01		-0.32	0.34	86.03
G02/J02		0.06	-0.18	117.15
C02		-0.22	0.70	91.32
R02		0.08	-0.13	114.99
R04		-0.32	0.34	86.03
G05/J05/E05/S05/C05/I05		-0.19	-0.45	120.04
R06		0.08	-0.13	114.99
E06/J06		-0.25	-0.04	110.46
C06		0.03	-0.02	123.33
E07/C07		0.16	0.02	117.13
E08/C08		-0.01	-0.21	117.39

Seules valeurs utilisées à ce jour.

Nouvelles calibrations (pré-REPRO3.)

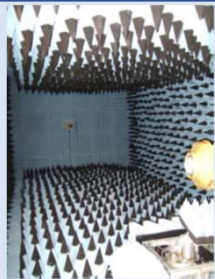
PCV: exemple: TPSCR.G3 NONE



Calibrations d'antennes différentes donnent des variations allant jusqu'à 1 mm horizontalement et entre 3 et 7 mm verticalement (Baire & all, 2012).

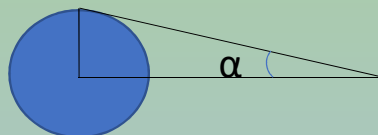
[Differences between GPS receiver antenna calibration models and influence on geodetic positioning \(2012\)](#)

by Q. Baire, W. Aerts, C. Bruyninx, E. Pottiaux, J. Legrand, presentation at the Fall 2012 American Geophysical Union Meeting



Corrections PCO/PCV* des antennes : du relatif...

	demi grand axe	angle de visibilité de la Terre
GPS	~26500 km	13.6°
Glonass	~25500 km	14.1°
Galileo	~30000 km	12°



⇒ Corrélations importantes entre horloges et CDP satellite qui apparaissent dans les mesures comme un biais radial.

⇒ Idem coté récepteurs terrestres

Les PCO/PCV influent directement sur l'échelle du réseau de station (scale ITRF).

Certains PCO/PCV récepteurs ont été calibrés au sol (Robot/Chamber calibration), les autres sont ajustés par traitement des observations.

Les PCO/PCV des satellites GPS utilisés sont des valeurs **relatives**.

(*) Phase Center Offset/Phase Center Variations

Diapositive 18

LS2

Loyer Sylvain; 06/09/2019

Vers une calibration « absolue » des antennes satellites ?

Cette problématique a donné lieu:

- à des jeux de PCV/PCO (fic. ANTEX) consistants mais incompatibles entres eux au fur et des calibrations absolues des récepteurs (igs05.atx / igs08.atx / igs14.atx ...)

The IGS switched to the new absolute antenna phase center model simultaneously with the switch to an IGS realization of the new international terrestrial reference frame ITRF2005 (<http://itrf.ensg.ign.fr/>; Altamimi et al., 2007) on 5 November 2006 (Gendt, 2006). As a consequence, a discontinuity was observed in all IGS product time series.

Exemple: lors de la réalisation de l'ITRF2005, in « *Generation of a consistent absolute phase center correction model for GPS receiver and satellite antennas* », from R. Schmidt & al. J. Geodesy, 2006.

- à l'impossibilité pour la technique GPS de servir utilement au « scale » de l'ITRF, jusqu'à ce jour.
- « The ITRF2014 scale is defined in such a way that there are zero scale and scale rate between ITRF2014 and the average of VLBI and SLR scales/rates” ← Pas de GPS !!

COMING SOON ! : CDP SATS ABSOLUS

Effort en cours dans le cadre de REPRO3 (2019/2010) pour calibrer les PCV/PCO en absolu avec les PCV/PCO Galileo fournis par l'ESA comme référence !

ATTITUDE

Les ATTITUDES DES SATELLITES GNSS EN DEHORS DU « YAW STEERING MODE »

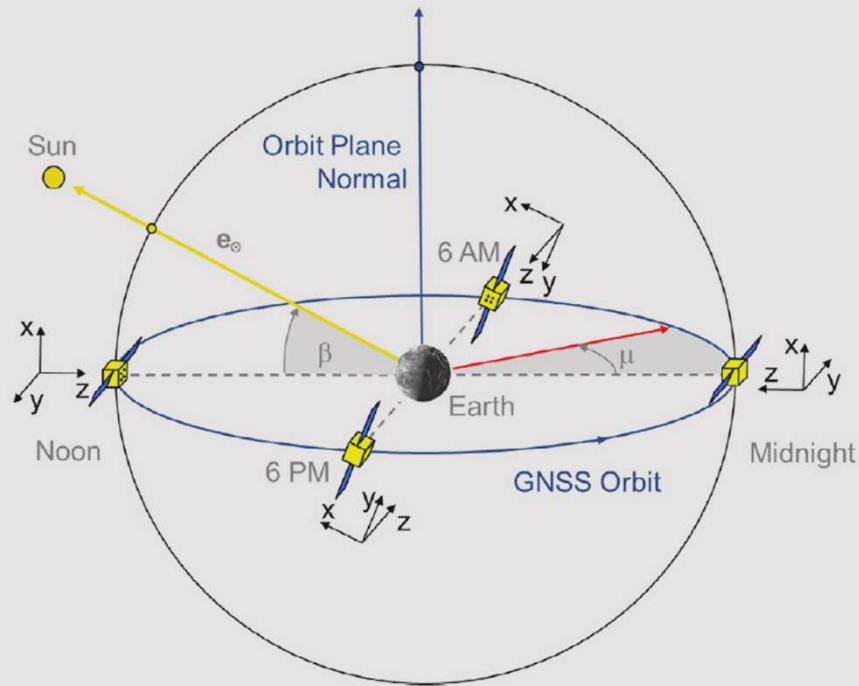


Fig. 2. GNSS satellite orientation in nominal yaw-steering mode. The x -, y - and z -vectors indicate the axes of the body-fixed reference frame $\mathcal{R}_{BF,IGS}$ (following the IGS axis convention), which is here aligned with the $\mathcal{R}_{YS}$ frame.

<= L'attitude nominale est aisée

Mais la plupart des comportements en phase d'éclipse sont inconnus (à part release de l'ESA)

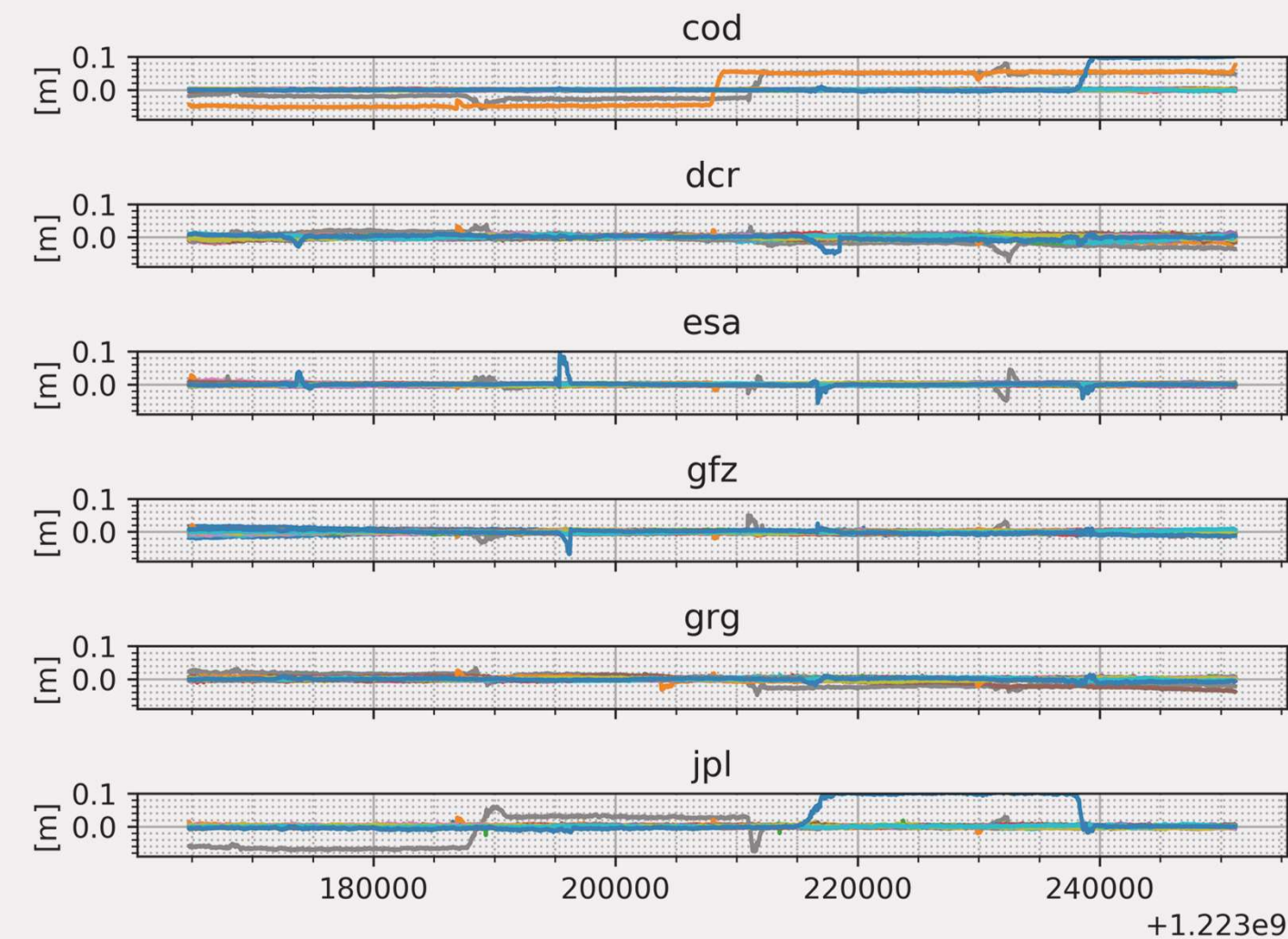
⇒ modèles empiriques / ajustés / Reverse PPP ...

En période d'éclipse on a autant de modèles que:

- de constellations
- de satellites (blocks)
- de logiciels...

From « GNSS satellite geometry and attitude models »,
O. Montenbruck et al. Advances in Space Research, 09/2015.

Example of clocks residuals from different IGS/ACs combination....



Impact presque direct sur les horloges des GNSS (via la correction de phase wind up)

+ Problèmes de blocage en phase d'éclipse ...

Comment combiner ?

Quelle attitude utiliser avec les produits combinés?

(Example dow 2022/3 from S. Banville, comm. Personnelle)

Les ATTITUDES DES SATELLITES GNSS EN DEHORS DU « YAW STEERING MODE »

Impact sur le PPP/IPPP qd l'attitude utilisée pour différent cas ...

- Attitude différente (autre logiciel)
- Satellites en éclipses supprimés

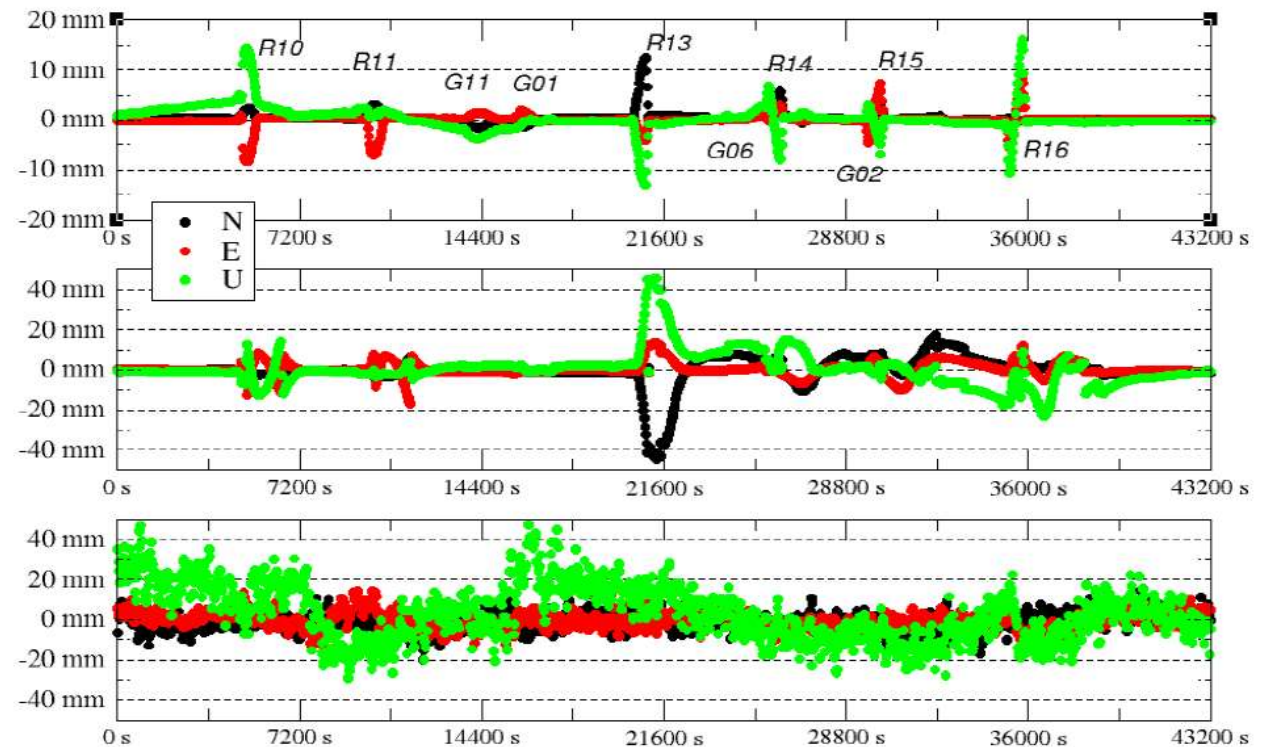
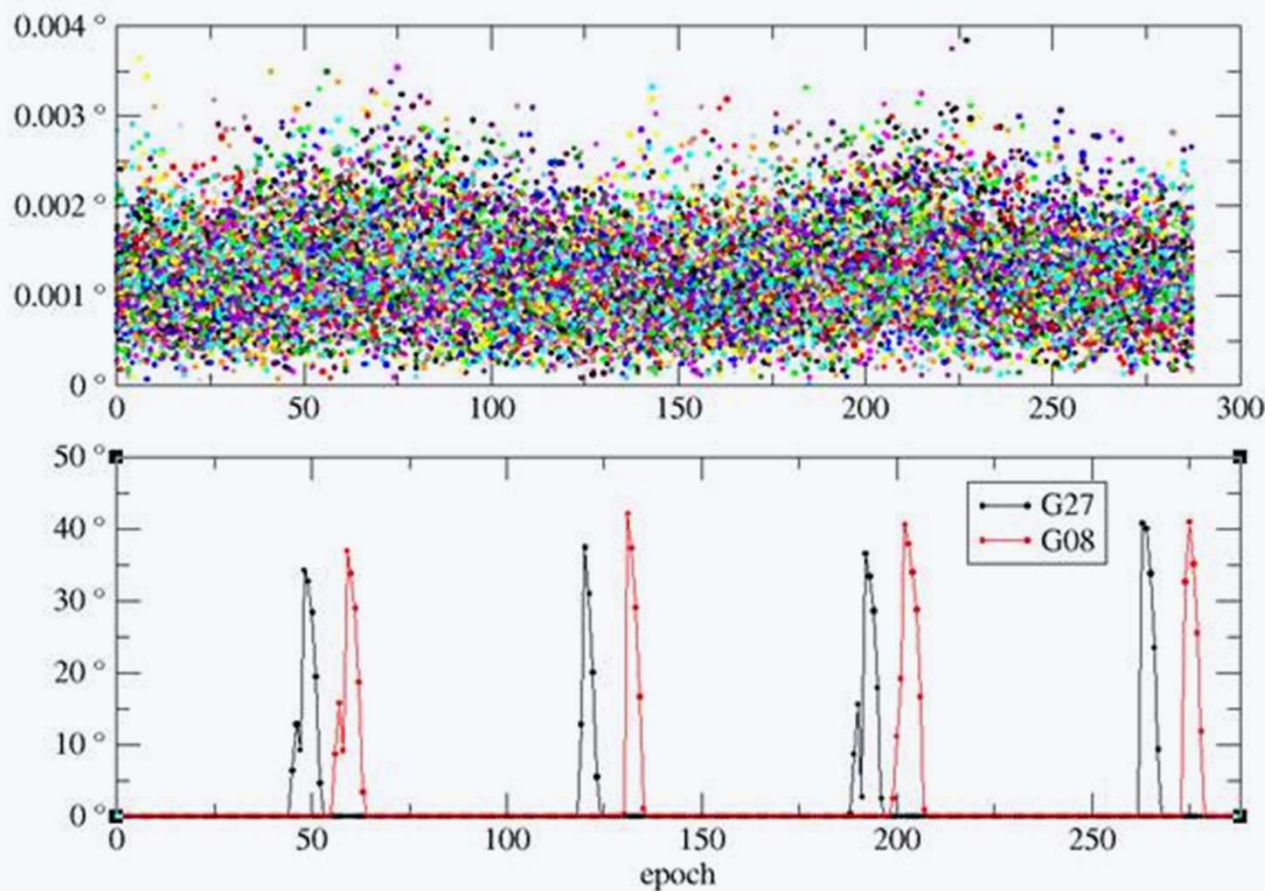


Figure 5: NRCan 30s-PPP solution using station ALGO on 13/01/2017. The reference solution is using the GRM products with consistent attitude (bottom). The top panel shows position differences when using an internal attitude modeling, while the middle panel shows position differences when ignoring eclipsing satellites.

From Loyer S, Banville S, Perosanz F, Mercier F (2017) *Disseminating GNSS satellite attitude for improved clock correction consistency*. IGS Workshop 2017, 3-7 July, Paris, France

Les $\neq$ ATTITUDES DES SATELLITES GNSS EN DEHORS DU « YAW STEERING MODE »

GFZ vs GRG attitude yaw differences, (GFZ attitude data provided by Benjamin Maennel , GFZ/POTSDAM)



Solution initiée :

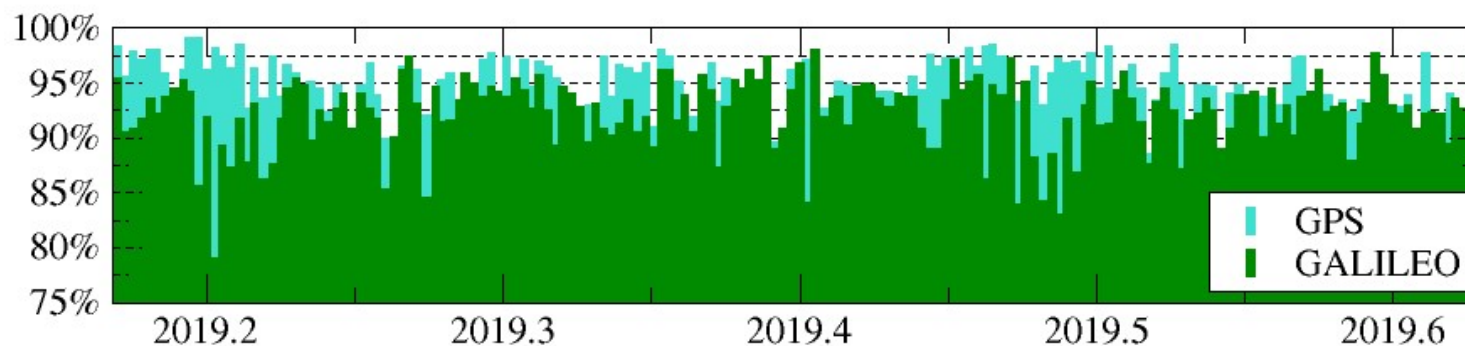
Echanger...
Comparer (orbex) ...
Corriger...?

... l'attitude utilisée pour générer
les produits de chaque CA.

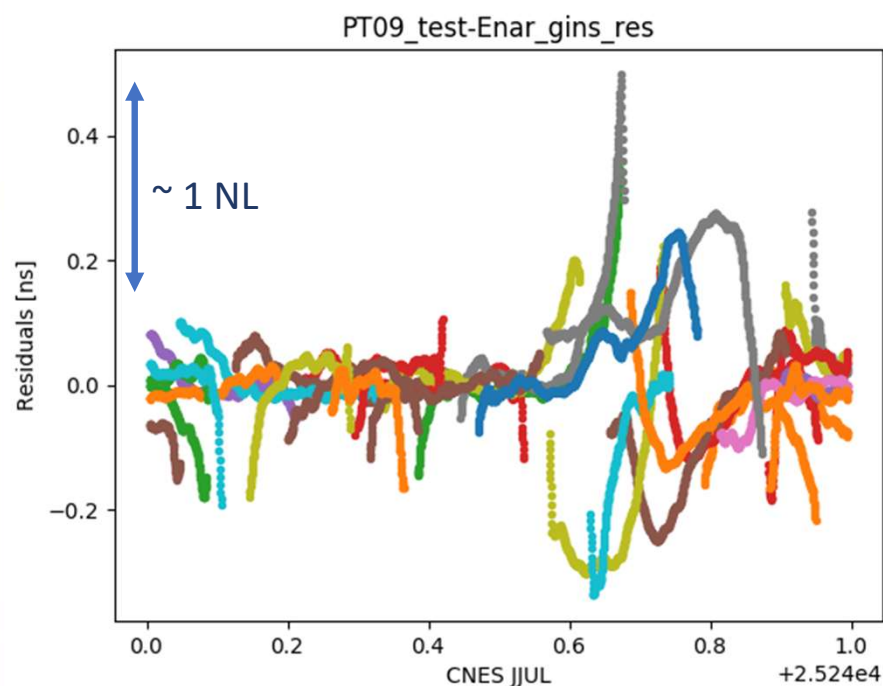
**A terme diffuser une attitude
compatible avec les produits
combinés...**

... a suivre

AMBIGUITES



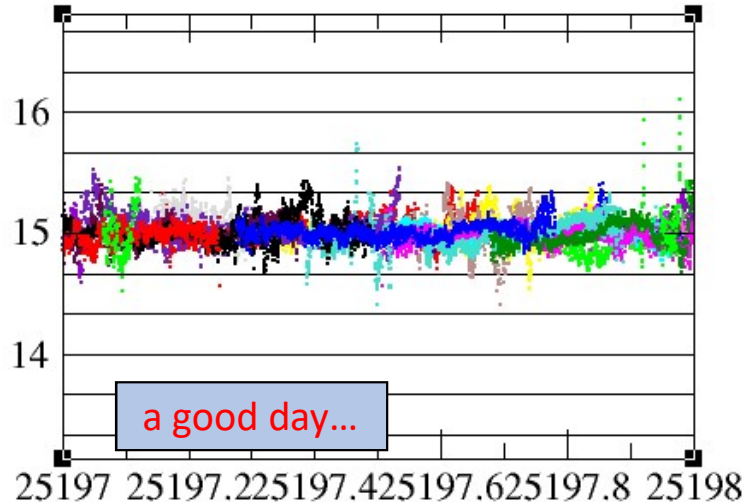
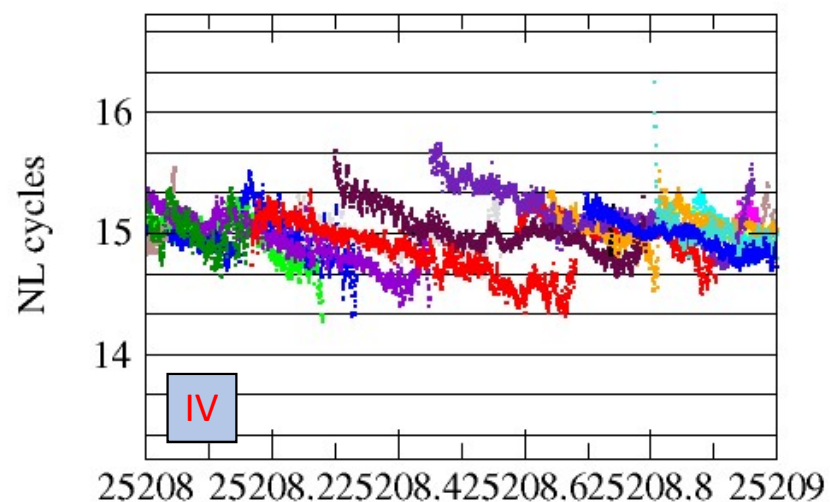
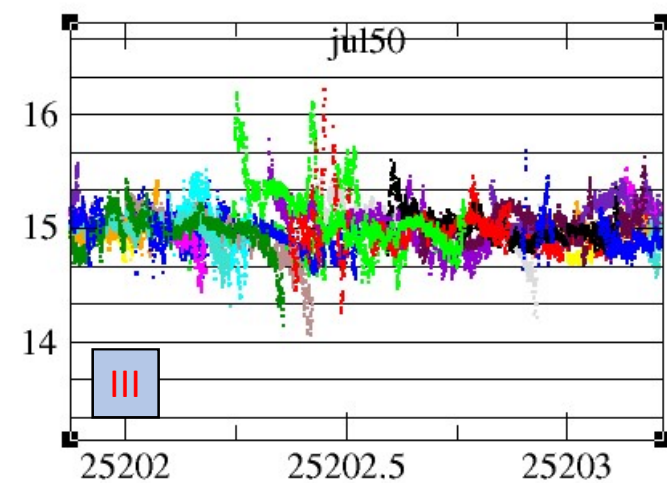
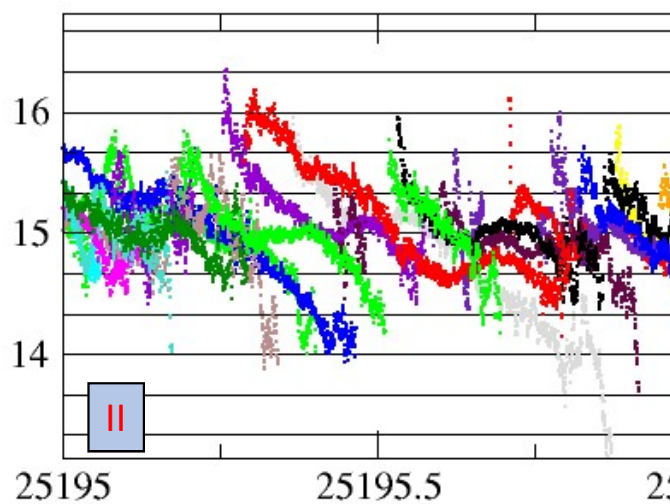
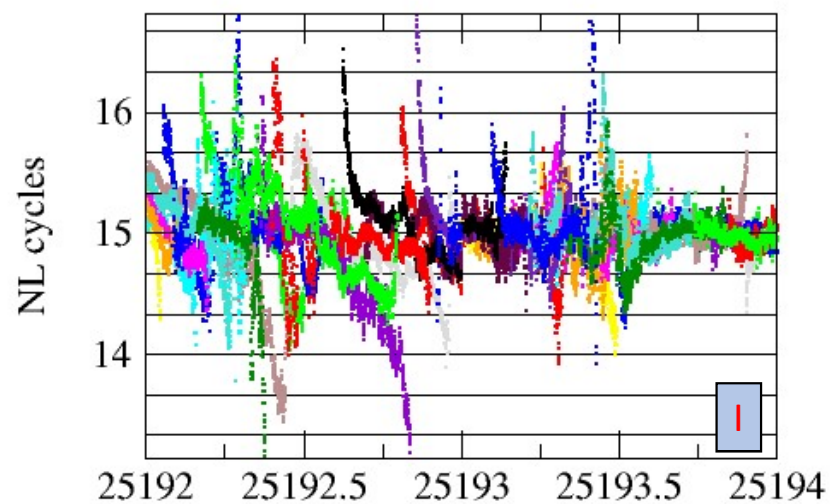
Taux de fixation
n'indique pas les
erreurs et n'est
très utile ici...



Fixation entière:
Sont ce les bons entiers ?
Quelles méthode pour
valider les fixations ?

Résidus à postériori (ici signature d'une erreur de blocage
due à des corrections PWU mal faites en IPPP).
Parfois compliqué en traitement réseau (100-200 stations x
90 satellites)

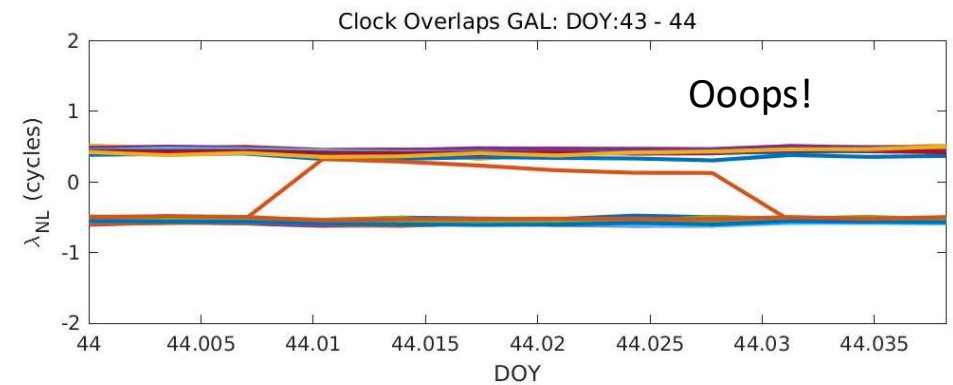
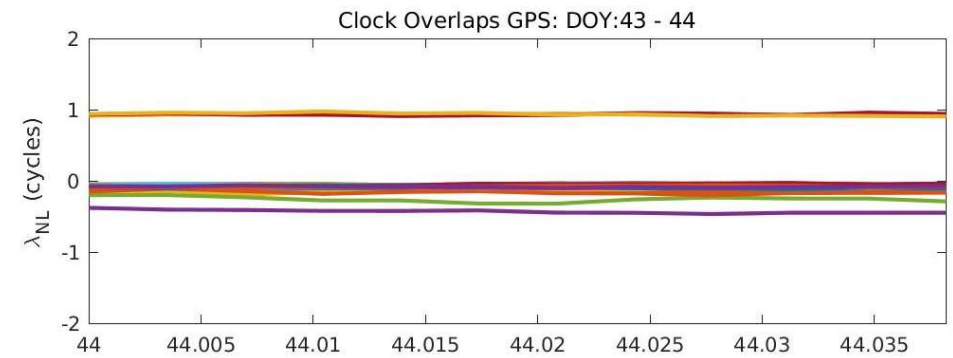
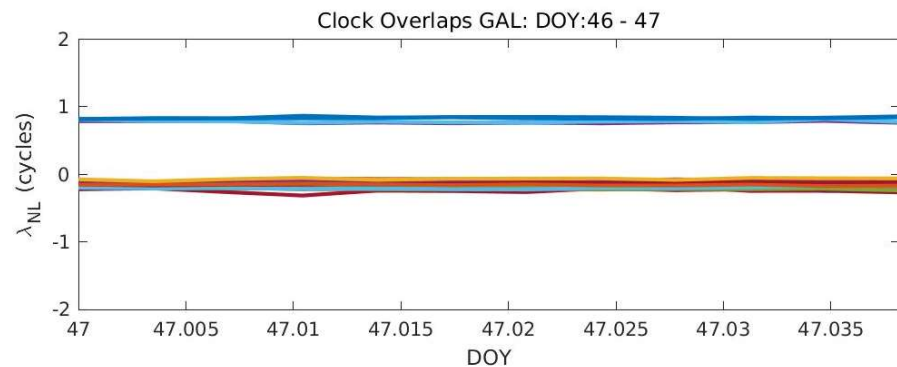
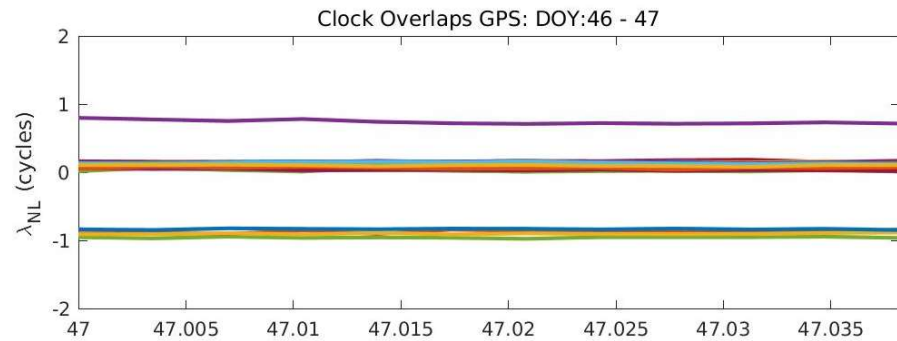
Galileo Phase residuals : 4 “bad” zones



jul50

jul50

Overlaps des horloges entières (corrigées des DeltaR):
la nature entière des horloges est très nette...et la
signature des anomalies de fixations aussi.



Idée : Comparer directement deux solutions d'ambiguités entre elles

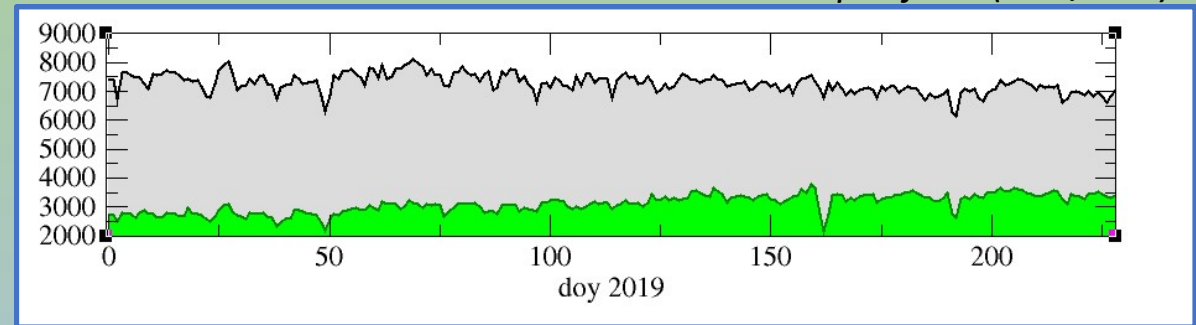
Comparer directement deux solutions d'ambiguïtés entre elles.

Pas simple à réaliser: nécessite des transformations des jeux fixés. (cf. thèse de G. Katsigianni qui a réalisé la première maquette de cet outil).

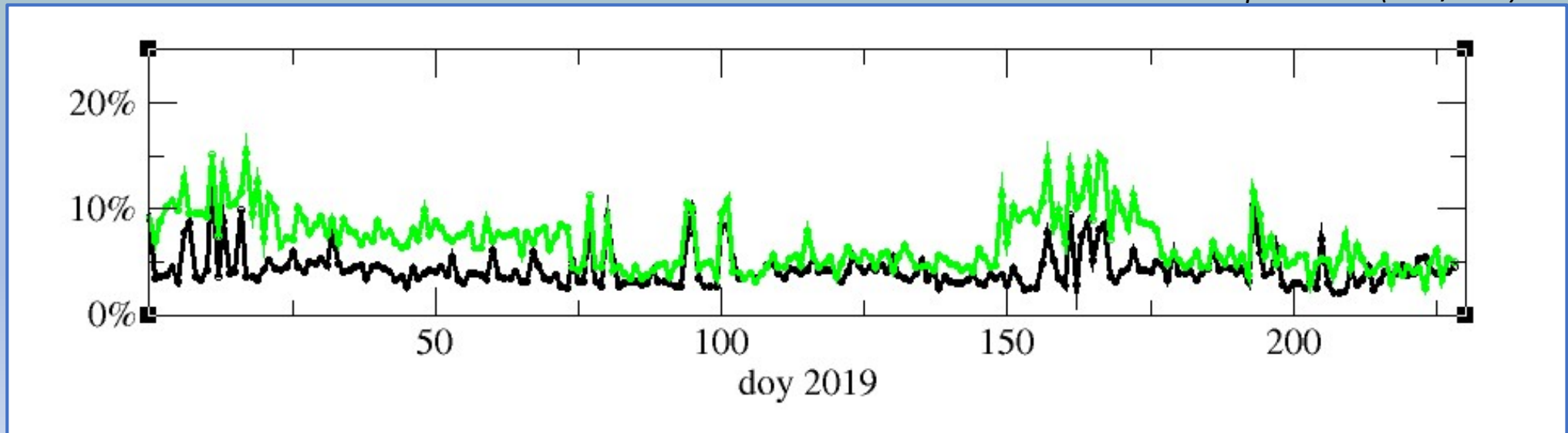
« Idefix » sort:

- un taux (en %) de désaccord entre deux solutions : même jour et réglages différents ou sur ambiguïtés communes deux jours successifs...(Deux solutions qui se recouvrent doivent avoir des ambiguïtés « égales »).
- Une liste possible des anomalies restantes.

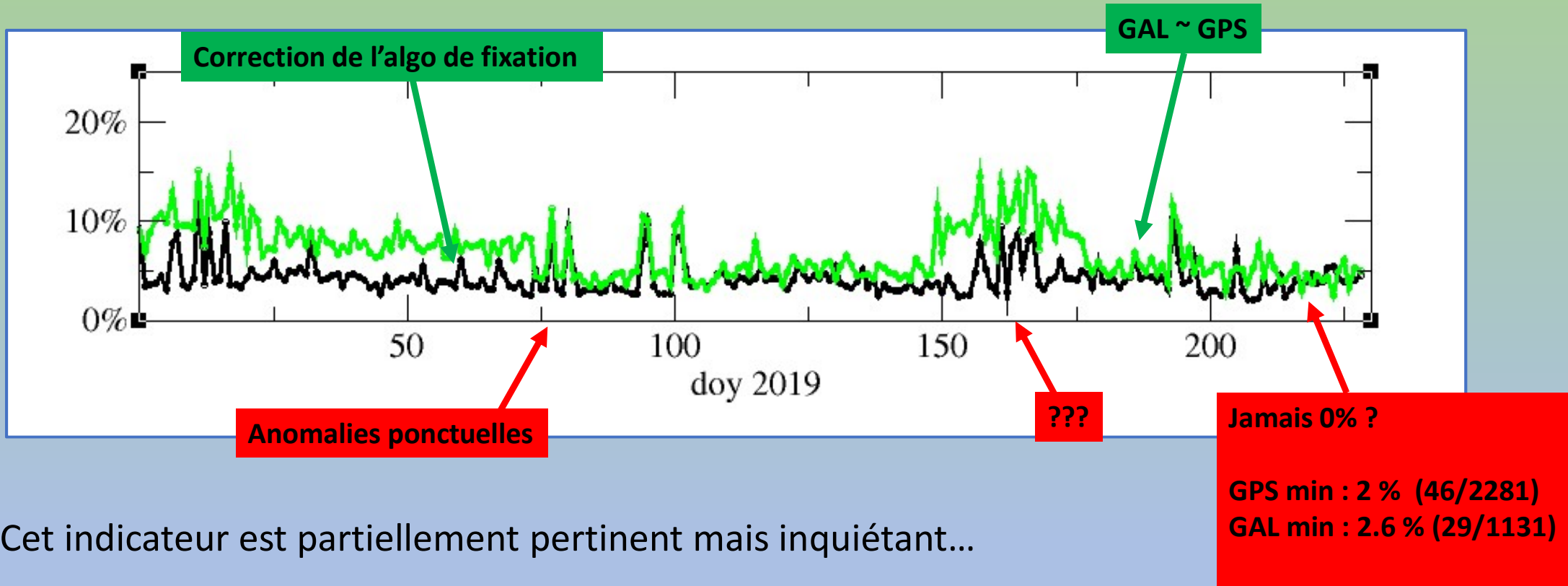
Nb ambi par jour (GPS/GAL)



Taux de désaccords depuis 2019 (GPS/GAL)



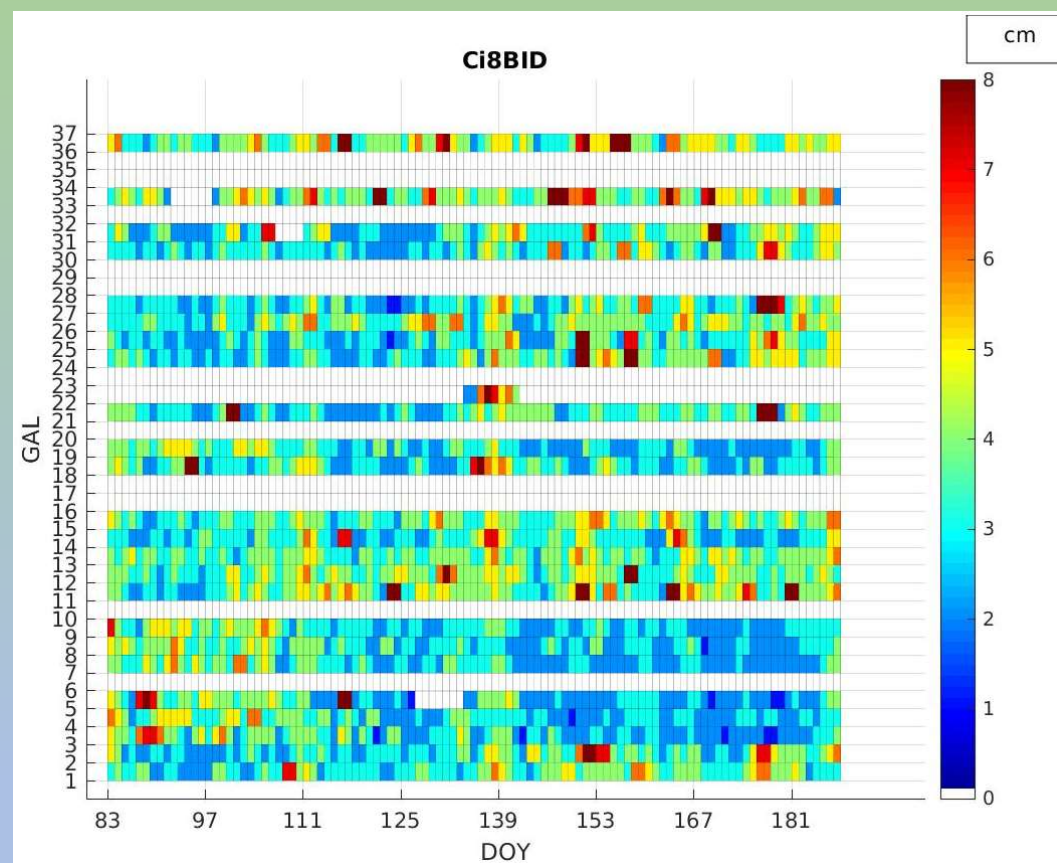
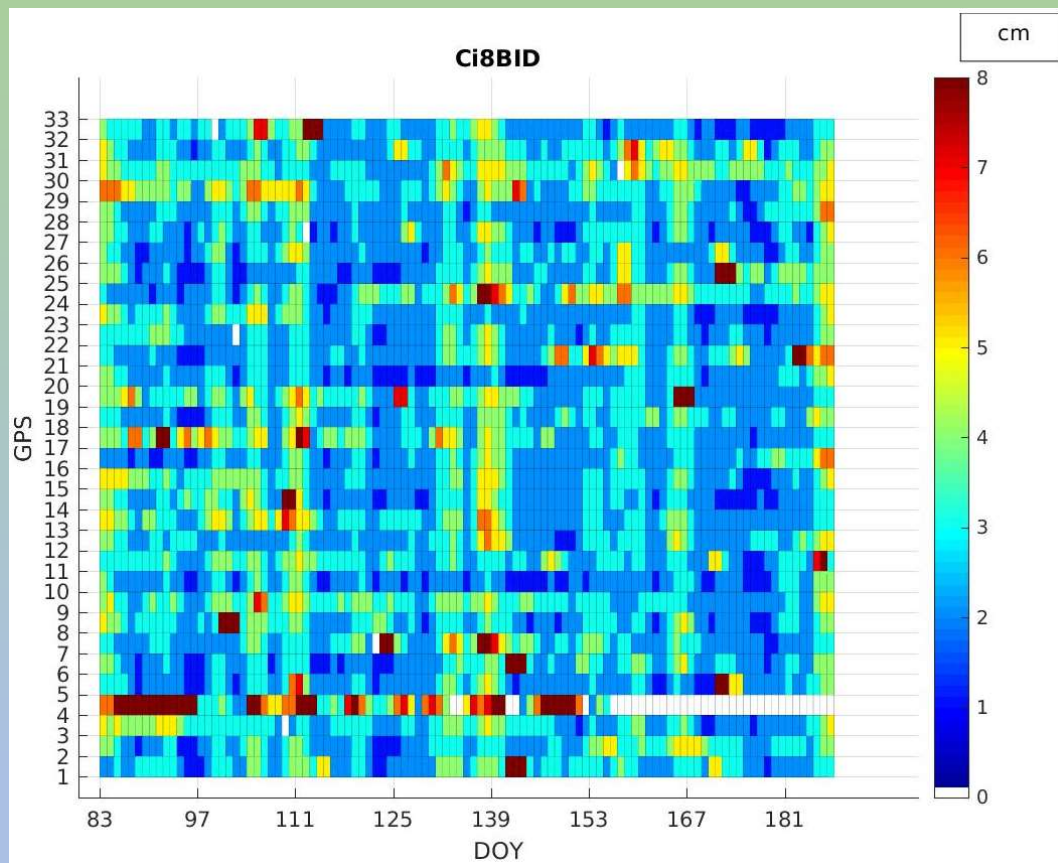
Bonnes et des mauvaises nouvelles pour ce nouveau test...



Cet indicateur est partiellement pertinent mais inquiétant...

- On ne comprend pas les anomalies (ne correspondent pas à des traces si visibles sur les overlaps d'orbites, cf. après)
- Modèles (antenne/pwu/...) ? Programme de fixation ? Programme de test ? ...

Anomalies entre doy 161-174 ?



Et maintenant, PPP/IPPP Galileo & Co

MERCI !

