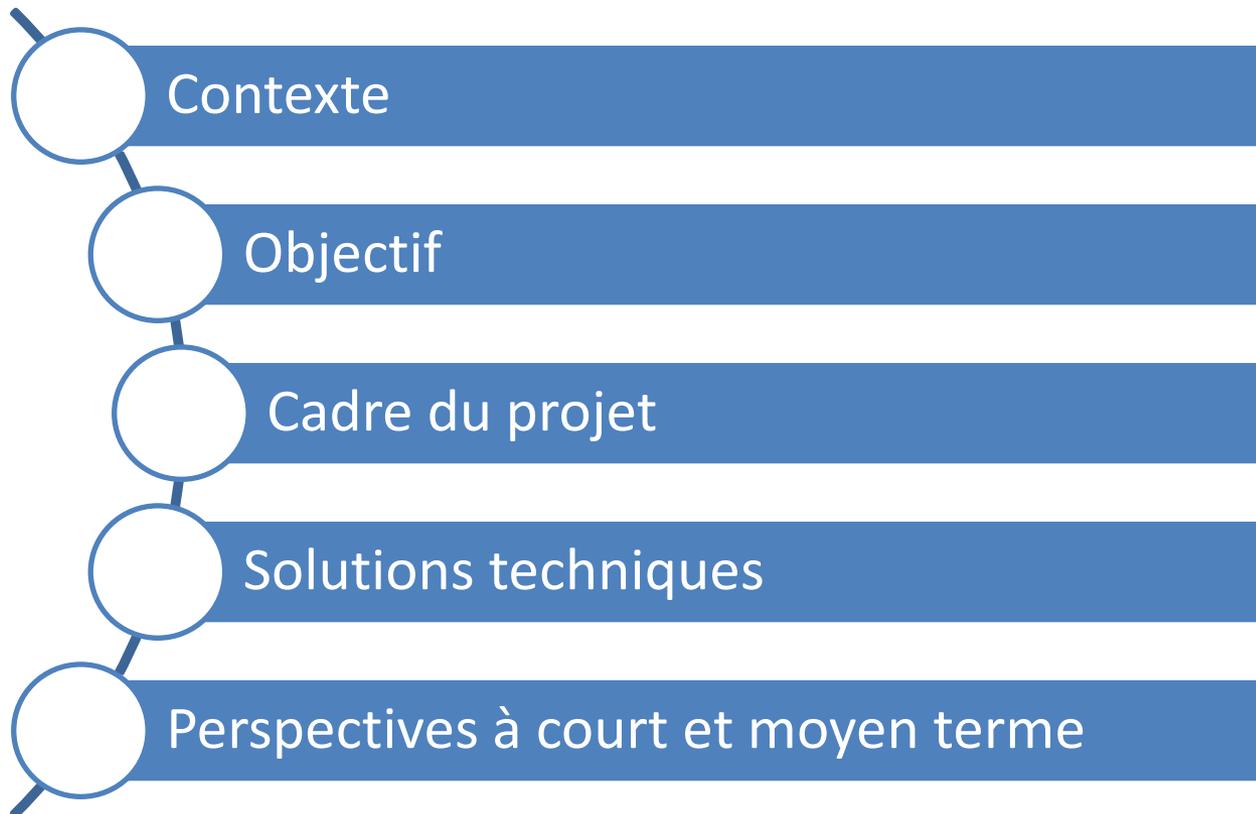


SYNCHRONISATION D'HORLOGES

DANS UN RÉSEAU PHASÉ DENSE



CONTEXTE

- ↪ La radioastronomie
- ↪ Le projet SKA
- ↪ Les réseaux phasés
- ↪ Synchronisation des réseaux phasés
- ↪ Le projet AAIR

Contexte

Objectif

- **Radioastronomie**: études des ondes radio émises par les astres
- **Types d'observations**: pulsars, galaxies, comètes, soleil, particules à haute énergie, structure à grande échelle de l'Univers
- **Exemple de radiotélescopes**

Cadre projet

Radiotélescope de Nançay

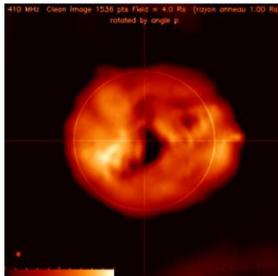


Interféromètre de Nançay

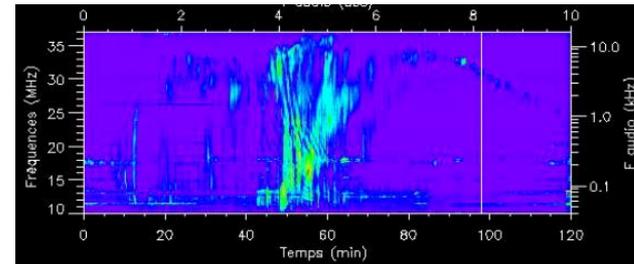


Solution technique

- **Exemples de signaux reçus**



Observation du soleil par interférométrie



Spectre dynamique de Jupiter

Perspectives

Contexte

Objectif

Cadre projet

Solution technique

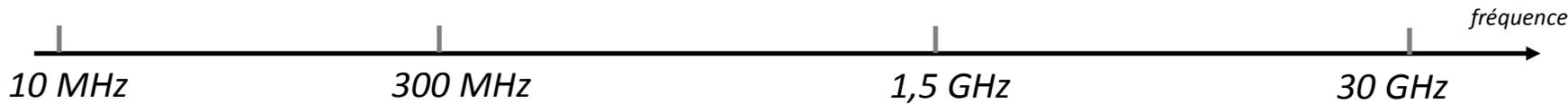
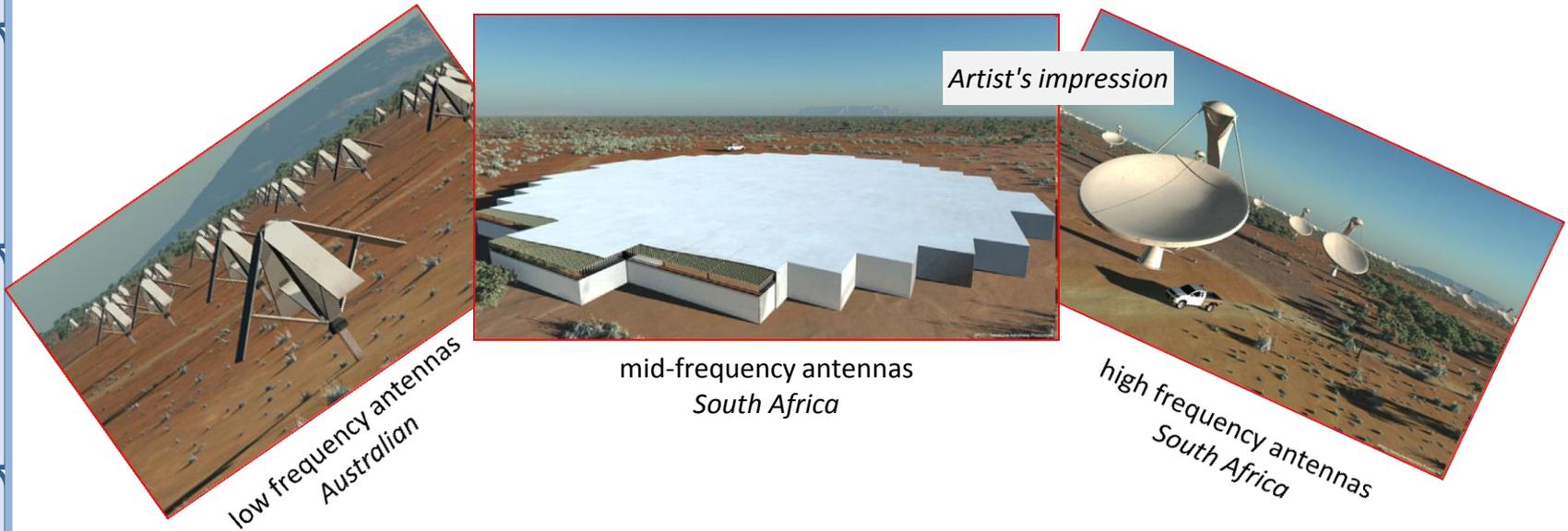
Perspectives

Le projet SKA Square Kilometer Array

2020-2025
1,5 Milliards €

- Construction d'un radiotélescope d'une surface collectrice de 1 million de m².

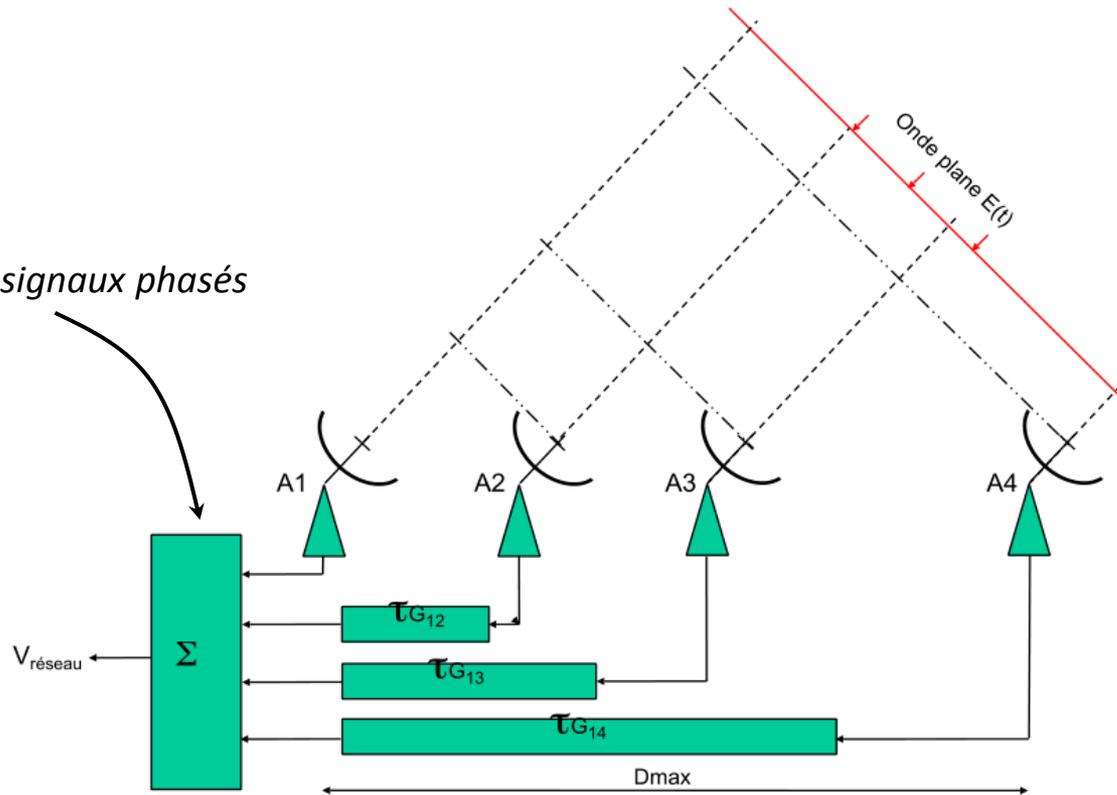
3 types d'antennes



Les réseaux phasés

- Principes

Ajout de signauxphasés



N antennes $\Rightarrow N$ retards variables de 0 à D_{max}/c

- **Exemple de réseaux phasés: le projet Embrace*** (SKA Design studies)



*Embrace: Electronic Multi Beam Radio Astronomy ConcEpt

Prototype préparatoire à SKA – concept européen

But: étude et caractérisation d'un réseaux phasé d'antennes, impacts techniques (industrialisation, maintenance, logistique, alimentation électrique ...)

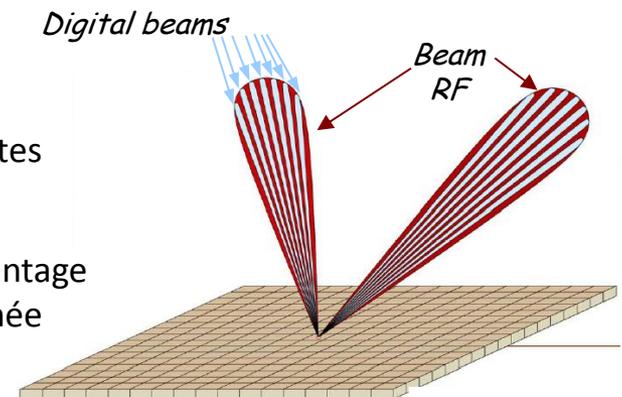
-> 64 m² à Nançay et 144 m² à Westerbork (Pays-Bas)
> 4000 antennes

-> 500 MHz à 1,5 GHz (mais 100 MHz instantanée)

-> Partenaires: **ASTRON** (Pays-Bas), **Nançay** (France), **MPI Bonn** (Allemagne) et **INAF Medicina** (Italie)

- **Caractéristiques des réseaux phasés**

- > Plusieurs directions de visée simultanées et indépendantes
- > Très grand nombre de faisceaux synthétisables
- > Simplicité mécanique: pas de système mécanique de pointage pour le suivi de source et temps de réponse quasi-instantanée
- > Très facilement configurable



Contexte

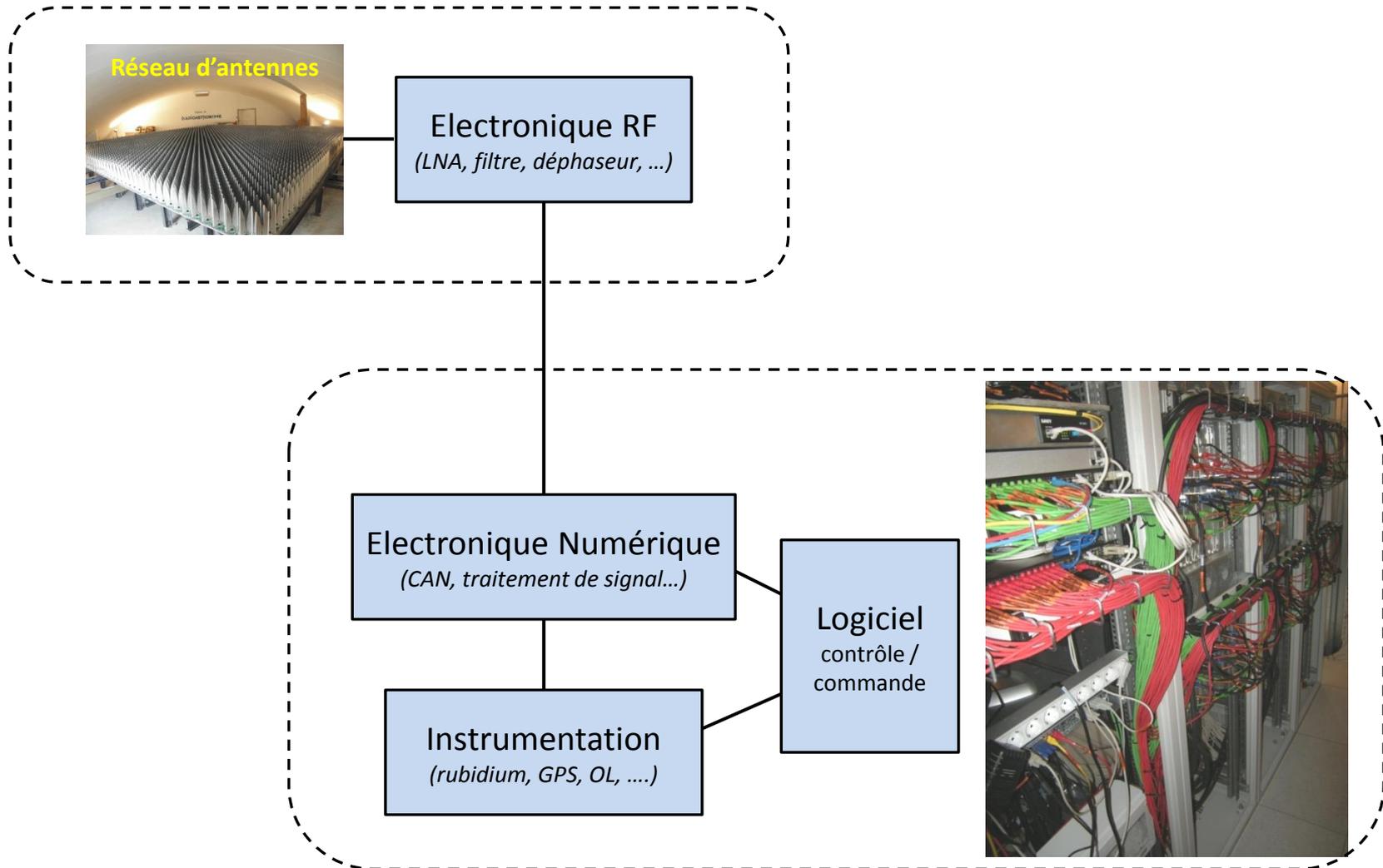
Objectif

Cadre projet

Solution technique

Perspectives

• **Architecture système**



Contexte

Objectif

Cadre projet

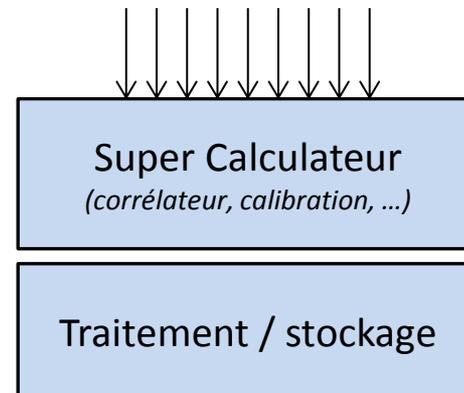
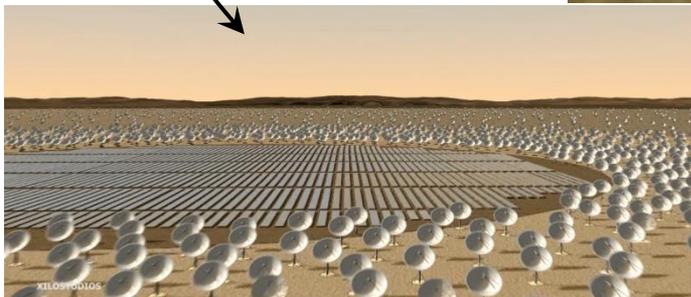
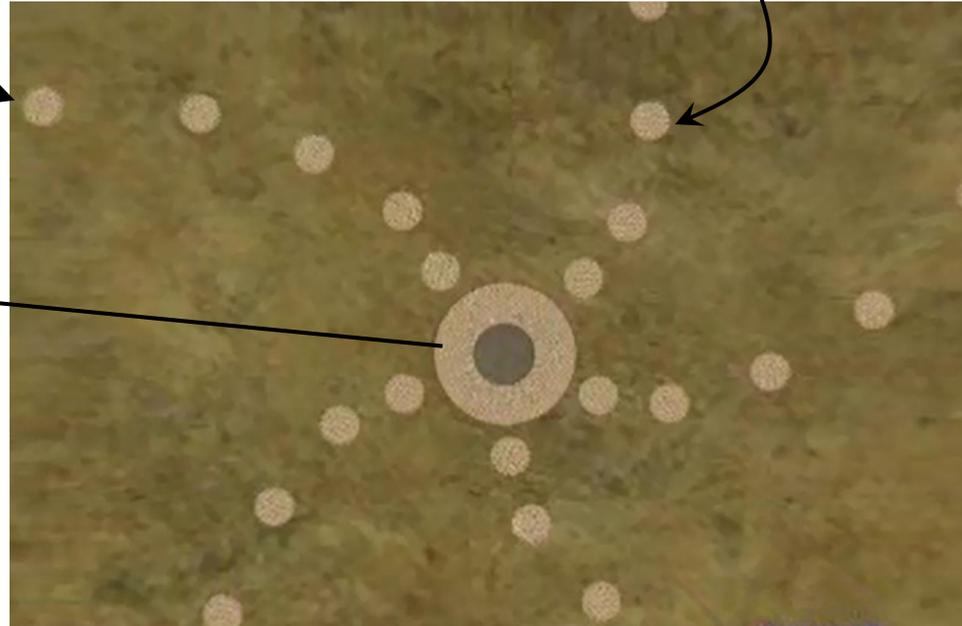
Solution technique

Perspectives

- **Déploiement de SKA** stations éloignées de quelques km à centaines de km

- > Haute sensibilité
- > Haute résolution angulaire

cœur de SKA



Synchronisation des réseaux phasés

Contexte

Objectif

Cadre projet

Solution technique

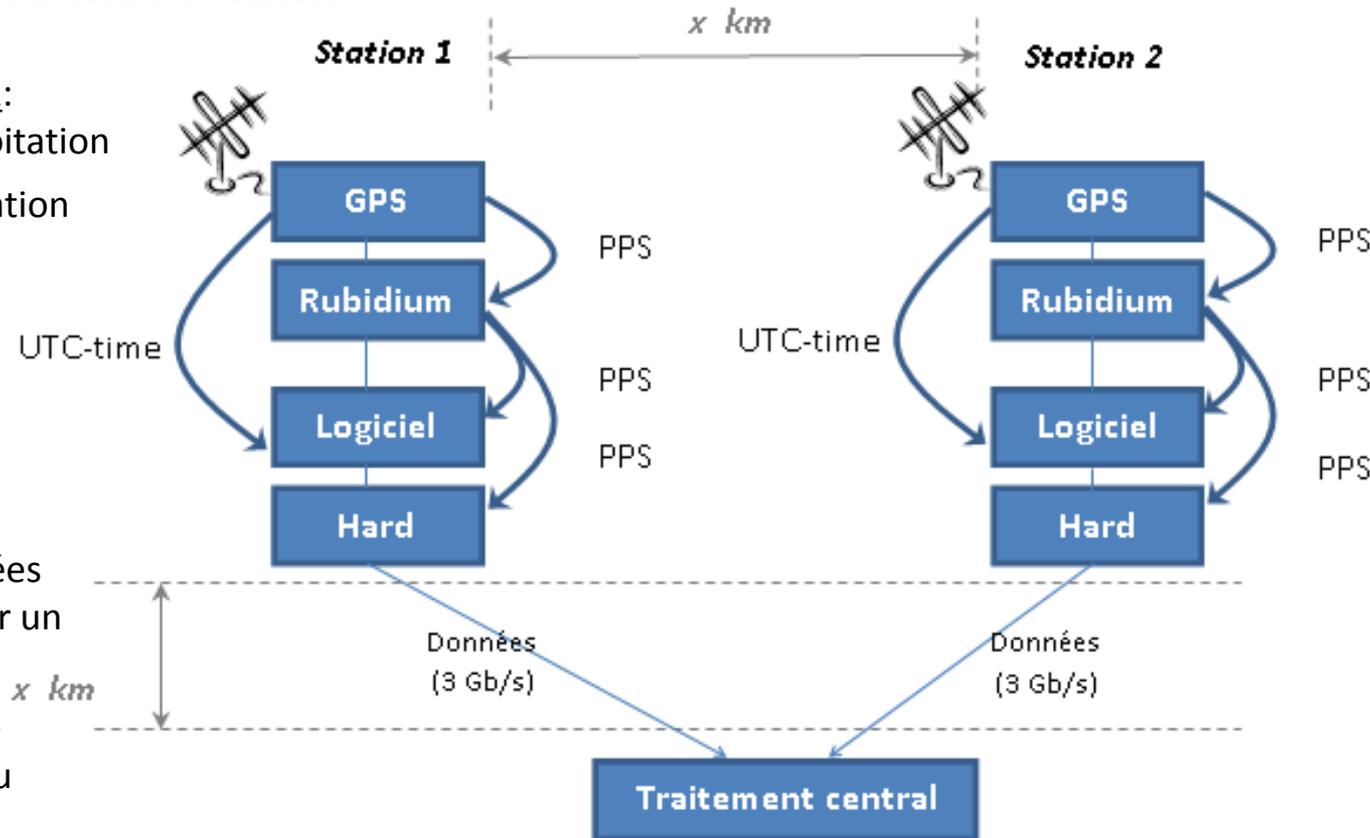
Perspectives

- Synchronisation entre stations**

-> Cas du réseau LOFAR:
réseau en cours d'exploitation
-> fréquence d'observation
entre 30 et 240 MHz

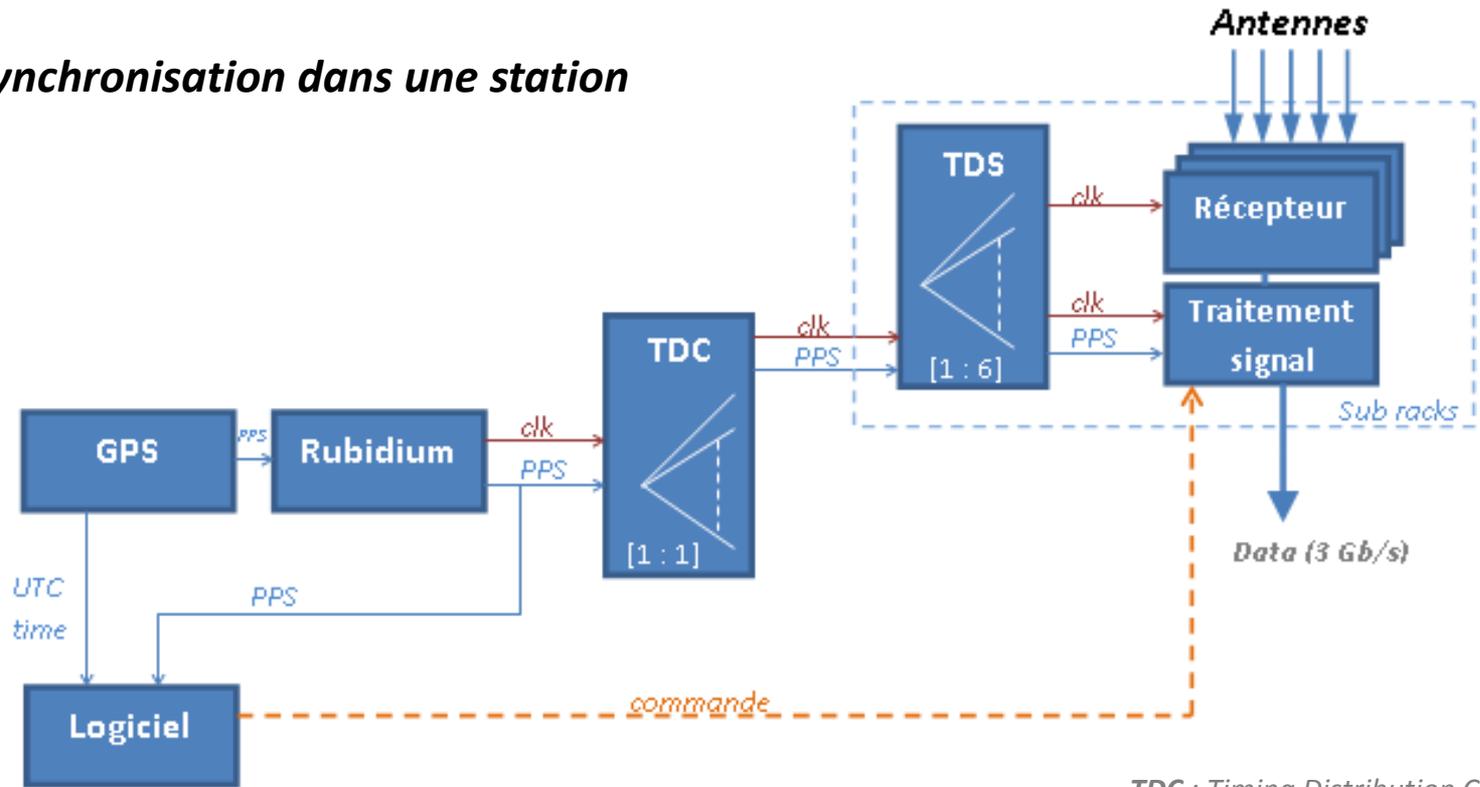
-> données synchronisées
dans chaque station par un
rubidium et GPS

-> synchronisation faite
également au niveau du
traitement central par
corrélation des données



Synchronisation non étudiée dans le cadre du labex

• **Synchronisation dans une station**



TDC : Timing Distribution Control
TDS : Timing Distribution Subrack

- > fréquence de référence (10 MHz) en sortie du Rubidium
- > fréquence d'échantillonnage 200 MHz synchronisée sur le 10 MHz
- > datation des données faites par le PPS
- > synchronisation assurée par les cartes TDC et TDS
- > **La synchronisation est centralisée dans un container maintenu à température constante**

Le projet AAIR

AAIR (*Aperture Array Integrated Receiver*): ANR inscrit dans le cadre du projet SKA

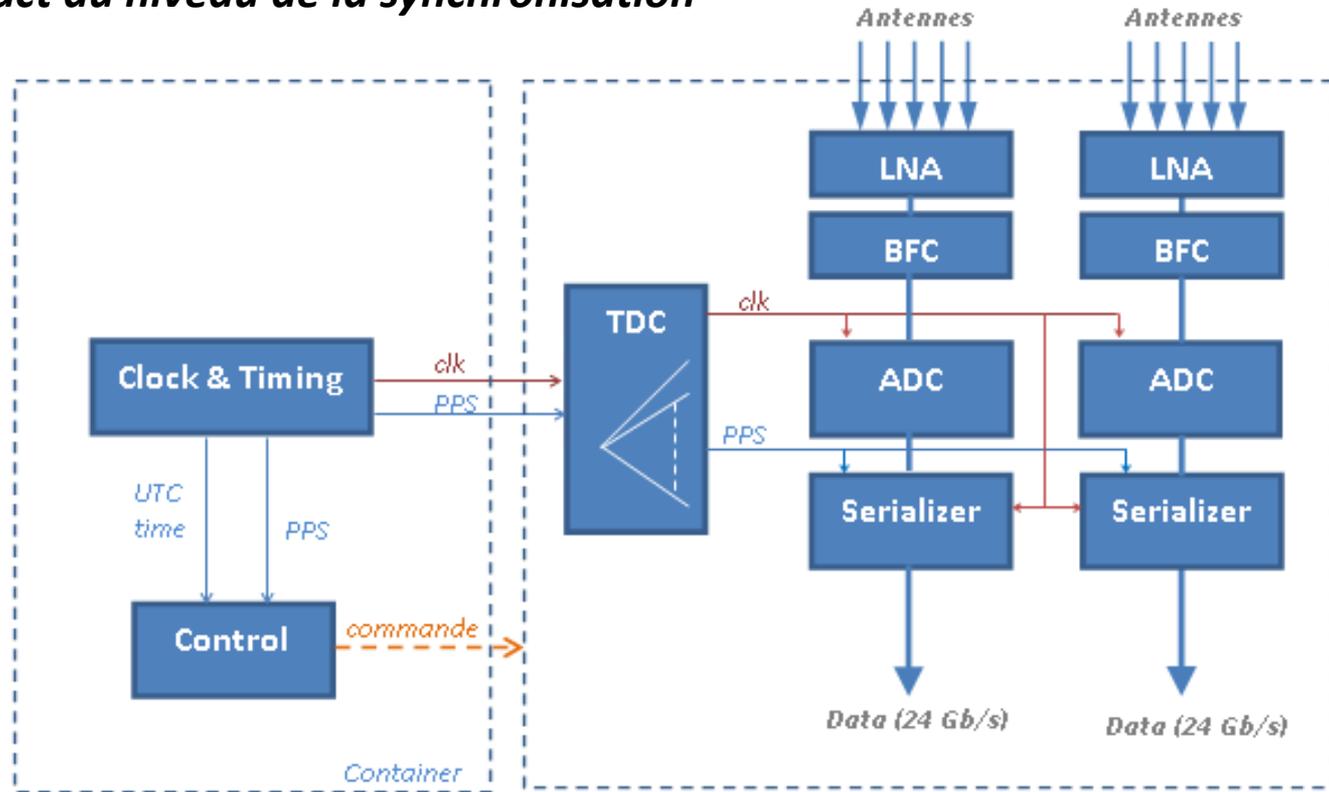
- **Différences conceptuelles**

- > Numérisation directement sous les antennes
- > Intégration de l'électronique RF (LAN+filtre, Beamformer à temps de retard, CAN+ serializer)
 - réduction des coûts
 - réduction de la consommation énergétique

- **Spécificités de AAIR**

- > Large bande de fréquence instantanée observable: 500 MHz à 1,5 GHz
- > 2 directions de visées indépendantes – 2 polarisations

- Impact au niveau de la synchronisation



-> La référence de temps se trouve dans un container (température constante).

-> La synchronisation des données est répartie sous les antennes donc soumis aux variations de températures

-> fréquence d'échantillonnage élevée (3 GHz)

OBJECTIF

- **Objectif principal**

-> Démontrer la faisabilité d'une remise en phase d'horloges ultra-rapides par des moyens RF et numériques.

- Numériser aux mêmes instants les signaux issus d'antennes réparties
- Dater le plus précisément possible les données numérisées

- **Applications**

-> Cible visée : synchronisation plusieurs tuiles dans la configuration AAIR.

-> futurs instruments à réseau phasé

Contexte

Objectif

Cadre
projetSolution
technique

Perspectives

- **Contraintes techniques**

- > Faible coût: contraintes industrielles – réplication à grande échelle
- > Influence sur le déphasage et retard sur chaque horloge de numérisation
 - de la température sur les composants et câbles
 - de la longueur des câbles utilisés pour la synchronisation
 - de la fréquence de numérisation élevée (3 GHz)
 - des jitters et déphasages des différents composants
- > Faible consommation
- > Synchronisation sur de courtes distances (environ 200 mètres maxi)
- > Impact de la pollution électromagnétique

- **Contraintes scientifiques**

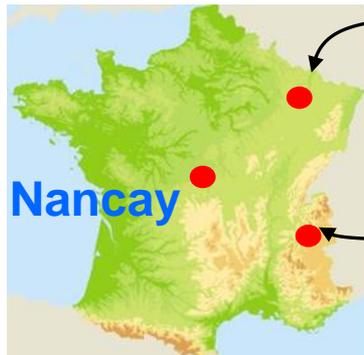
- > Très bonne stabilité dans le temps de la synchronisation (suivi de source)
- > Datation précise des données pour avoir une bonne information sur les corrélations entre tuile (calibration d'une station)
- > Précision et stabilité de l'horloge (Corrélation de données de plusieurs stations)

CADRE DU PROJET

- **Contexte**

Aspect système à résoudre en amont → Demande au **Labex First-TF**

- **Organisation**



Laboratoire **UTINAM**
Spécialisé dans le domaine du temps/fréquence

Entreprise **GORGY TIMING**
Spécialisé dans le domaine de la distribution du temps et la synchronisation de systèmes

Juillet 2013 – Juillet 2014

- **Moyens financiers**

- > CDD d'un an
- > Equipement: 25k€

Contexte

- **Planification**

- > Etat de l'art dans le domaine de la synchronisation système à numérisation rapide (ASTRON, CERN, ...)

Objectif

- > Conception et implémentation d'un prototype avec la solution retenue (synchro de 4 cartes ADC \Rightarrow fréquence d'échantillonnage de 1 GHz) \Rightarrow en cours

- > Tests et caractérisations du prototype \Rightarrow à venir

- Influence physique – longueur des câbles , température, ...

- Mesure de l'impact dans le système (coût, CEM, calibration, précision de la synchronisation ...)

- Mesure de la précision et de la stabilité de la synchronisation

- **Evénements**

- > Présentation aux Pays-bas et en France du projet lors de meeting AAIR.

- > Rencontre avec Nançay / UTINAM / Gorgy Timing.

Cadre
projetSolution
technique

Perspectives

SOLUTIONS TECHNIQUES

Une étude a permis de définir les fonctionnalités principales suivantes:

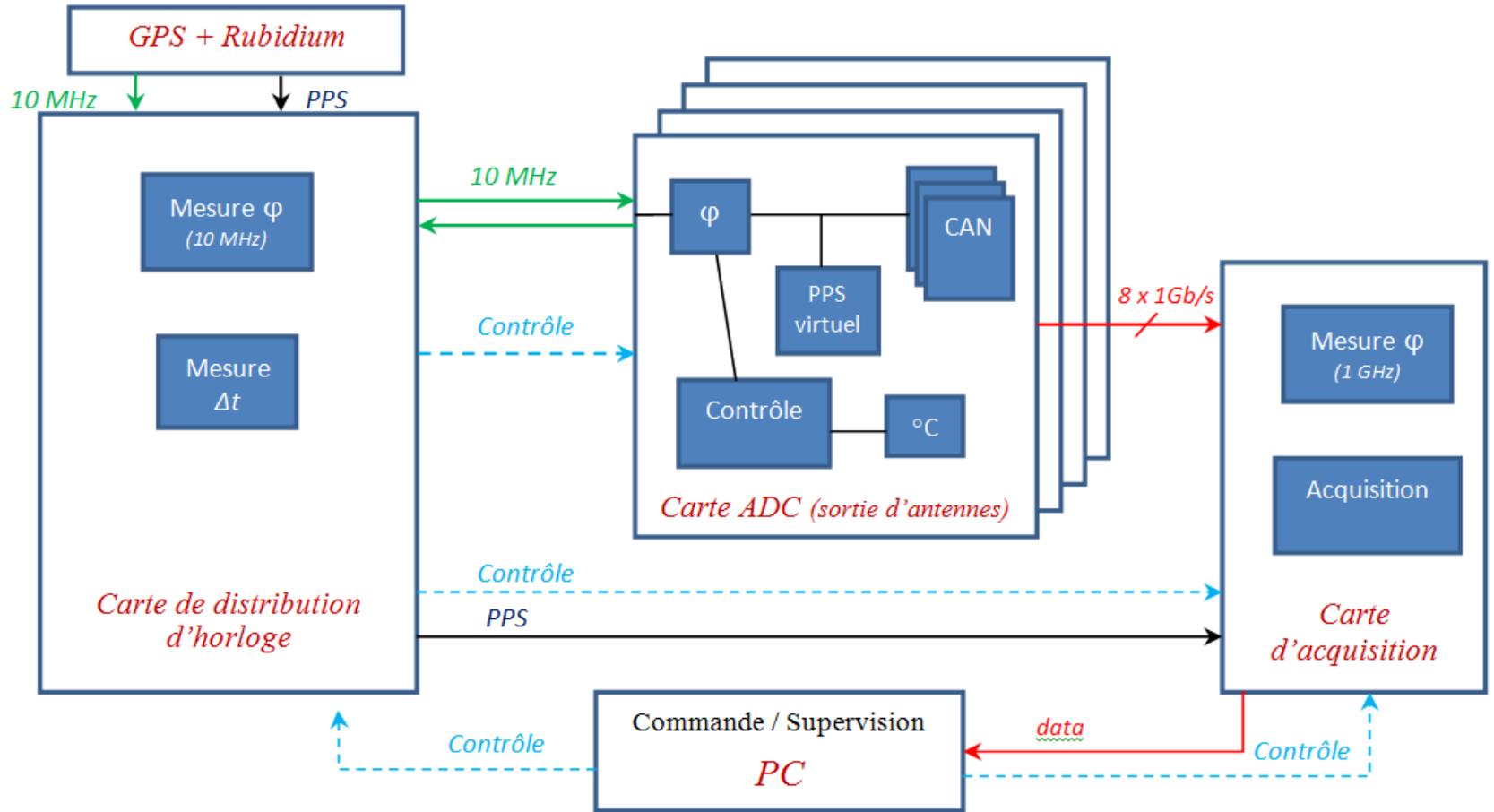
- Remise en phase des horloges 10 MHz avec une précision $< 0,1$ degré.
- Remise en phase des horloges de numérisation (1 GHz) avec une précision < 10 degrés.
- Mesure du décalage de périodes de l'horloge 10 MHz pour pouvoir dater les données numérisées.

- **Schéma de principe**

Le prototype de tests comprend les sous-systèmes suivants:

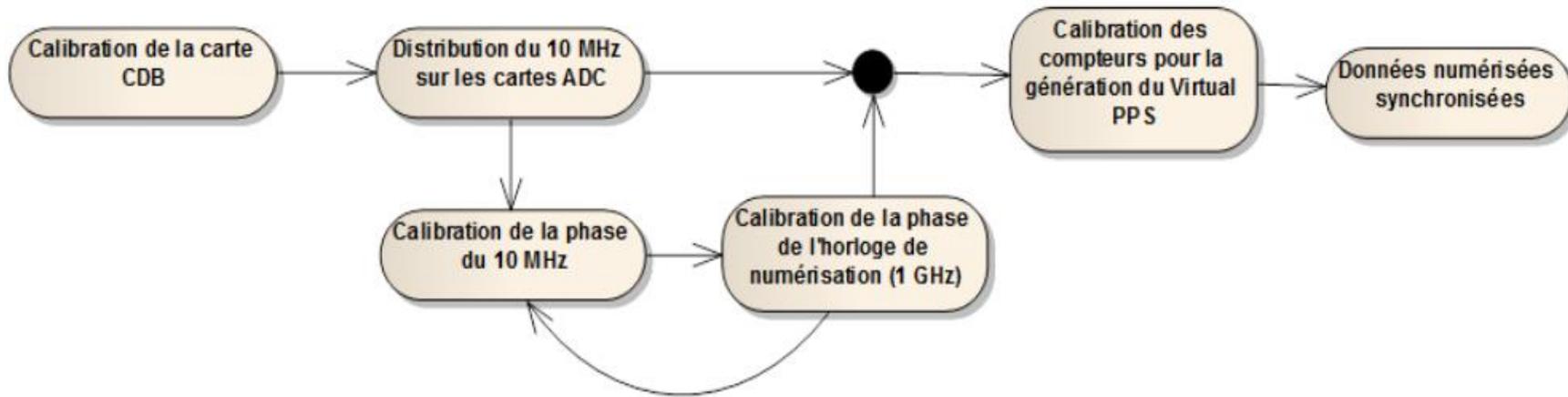
- 4 cartes ADC – simulation des tuiles : mesure des décalages temporels périodiques du 10 MHz.
- Une carte de distribution d'horloge : mesure et calcul par corrélation du déphasage des horloges entre les cartes ADC et pilotage du phasage du 10 MHz sur ces cartes.
- Une carte d'acquisition : mesure du déphasage de l'horloge de numérisation (1 GHz) en sortie de PLL des différentes cartes ADC et acquisition des données rapides.
- un ordinateur dédié au contrôle/commande pour réaliser les tests souhaités et également dédié à l'acquisition des données numérisées pour l'analyse des résultats.

Contexte
Objectif
Cadre projet
Solution technique
Perspectives



Architecture système de la distribution d'horloge dans un système réparti

- Phase de fonctionnement**



Une phase d'initialisation et une phase de calibration seront nécessaires en début de fonctionnement.

Ensuite, les mesures des phases et des décalages se feront en temps masqué, permettant une calibration de la synchronisation en temps continu

Contexte

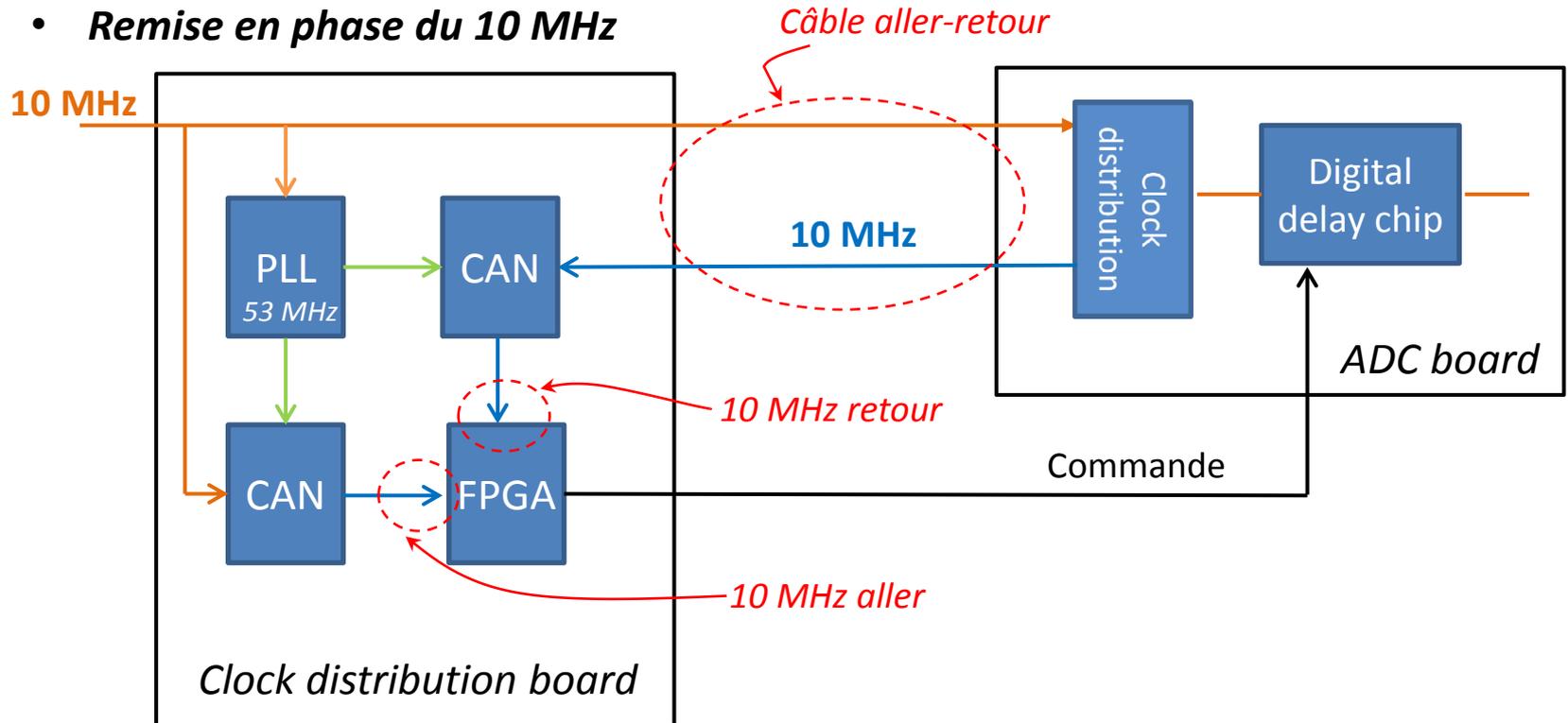
Objectif

Cadre projet

Solution technique

Perspectives

- Remise en phase du 10 MHz



- > Nécessité d'utiliser des câbles de même longueur entre la carte CDB et les cartes ADC.
- > Mesure de la phase par la technique de corrélation numérique (sur FPGA).
- > Remise en phase faite numériquement par des composants à temps de retards.
- > Remise en phase en continu -> compensation des variations de comportement du système (température, composants, ...)

Contexte

-> Une première étape de simulation a permis d'évaluer les performances d'une telle solution.

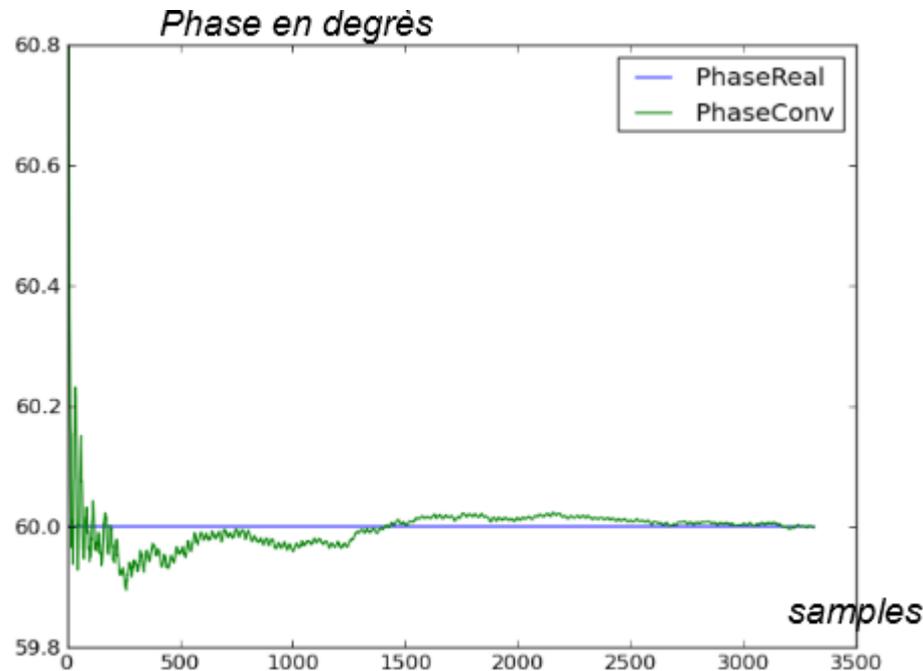
Objectif

-> Précision de remise en phase obtenue: $< 0,1$ degré.

Cadre projet

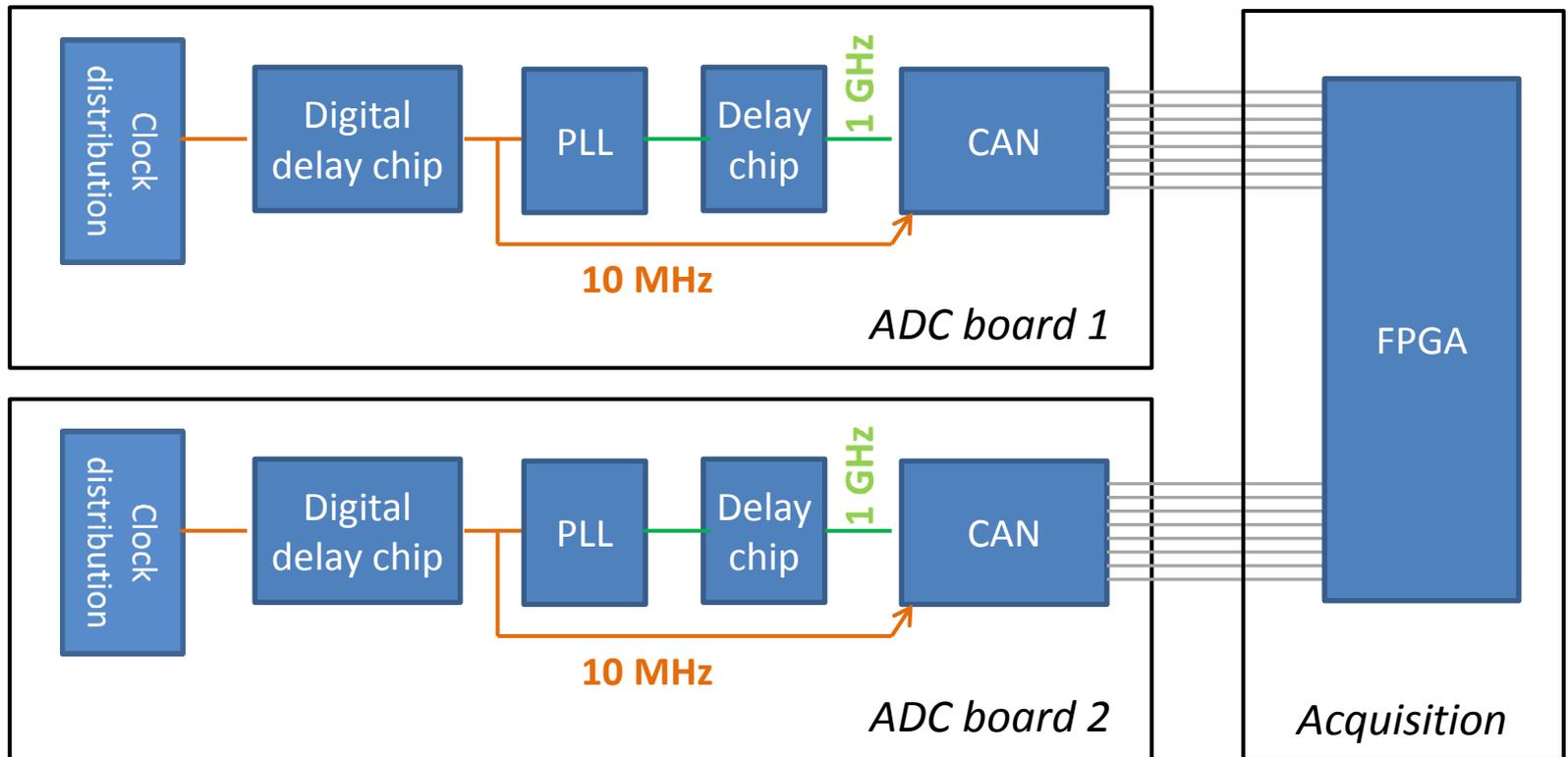
Solution technique

Perspectives



convergence de mesure de la phase (FFT de 16 échantillons)

- Remise en phase du 1 GHz



-> Un CAN est dédié à la remise en phase de l'horloge de numérisation (1 GHz).

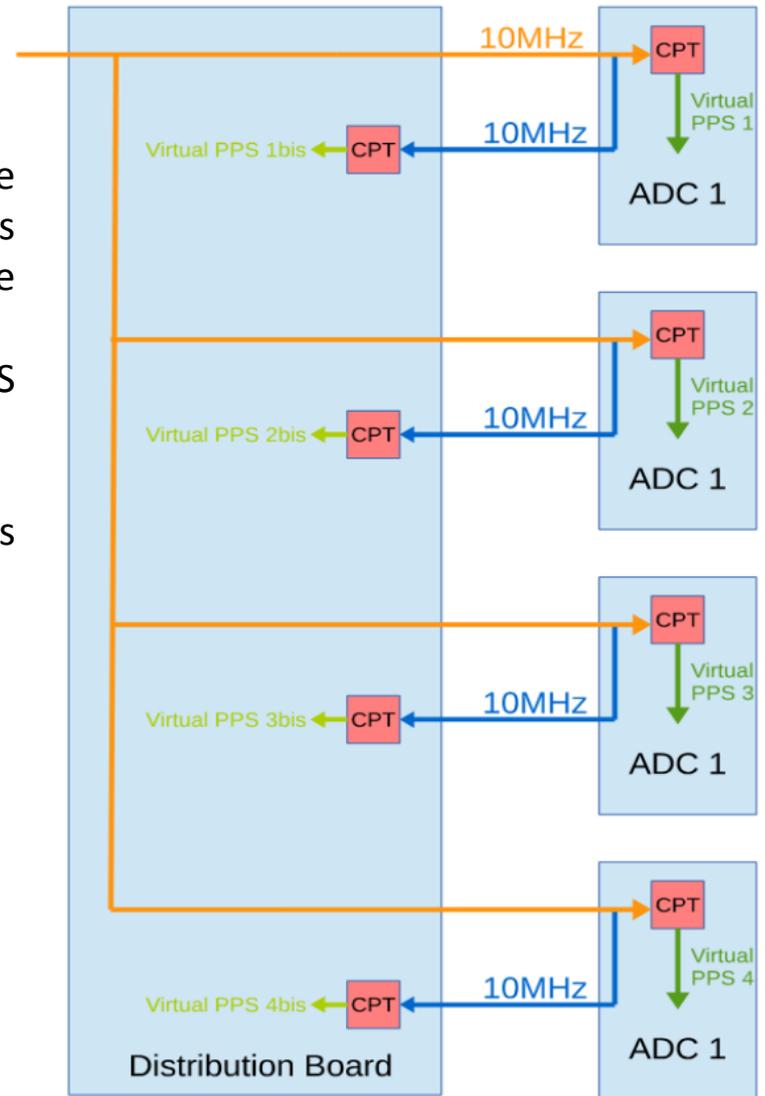
-> Même méthode que pour la remise en phase du 10 MHz (mesure par corrélation des signaux 10 MHz cadencé à 1 GHz et compensation par des delays chip).

- Prise en compte du décalage périodique**

-> Mesure du décalage de période d'horloge faite par le FPGA en comparant les compteurs comptabilisant les périodes du 10 MHz de chaque carte ADC.

Cette mesure de décalage associée au PPS permet de dater les données numérisées.

-> Les compteurs sont réalisés avec des composants programmables (CPLD).



PERSPECTIVES

- **A court terme**

-> Valider la solution de synchronisation proposée.

-> Vérifier la précision et la stabilité de la synchronisation dans le temps du système complet.

-> Mesurer l'impact de la température, de la longueur des câbles, des jitters et déphasages sur les composants, de la pollution électromagnétique.

-> Collaborer avec nos collègues hollandais d'ASTRON

Contexte

- **A moyen terme**

- > Etude d'un déploiement des concepts de cette synchronisation sur un réseau de tuile.

- > Intégration de modules dans des ASICS (puces).

- > Etre force de proposition au sein du projet SKA sur un aspect système complexe.

Objectif

Cadre
projet

- **A long terme**

- > Utilisation de ce concept pour la synchronisation de futurs travaux de recherche & développement pour un instrument interne à la station de radioastronomie de Nançay, le RadioHéliographe (interféromètre).

Solution
technique

Perspectives

Merci