



Ingénierie Système autour des 26000 photomultiplicateurs 3'' de JUNO

Cedric CERNA

REX - RIS

1^{er} juillet 2021



université
de BORDEAUX



2 mots plus personnels

- Physicien de formation
 - PhD 2000 en Physique Subatomique à l'UJF Grenoble
 - Post-Doc à l'INFN-Padoue
- Mais toujours le nez dans les détecteurs ...
- Et recruté en IR instrumentation au CPPM (Marseille) en 2002 puis CENBG 2011

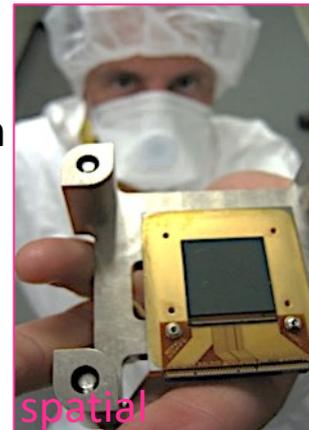
Quelques expériences intéressantes

- depuis 2019 : co-PI et représentant français du système SPMT du JUNO



1800m sous terre

- 2012-2017 : Coordinateur Technique de l'expérience neutrino SUPERNEMO

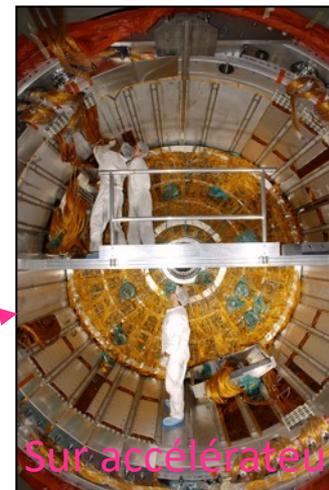


spatial

- 2004-2012 : programme spatial Energie Noire

- 2009-2012 : expert détecteur infrarouge du plan focal de l'instrument NISP de la mission EUCLID (ESA)

- 2004-2009 : expert détecteur infrarouge et ingénieur système du spectro de la mission SNAP/JDEM (NASA)



Sur accélérateur

- 2002-2005 : responsable d'intégration et tests du calorimètre bouchon d'ATLAS au LHC (CERN)

2 mots sur l'Ingénierie Système

L'ingénierie système s'occupe :

- De l'analyse du besoin
 - De la gestion des specs
 - De la configuration
 - Des budgets
 - De l'architecture système
 - De la gestion des interfaces
 - De la vérification
-
- Elle s'appuie sur la qualité
 - Elle interagit fortement sur le plan de développement avec le management

Management



Ingénierie Système

Qualité

Si vous avez un doute,
inscrivez-vous à la
prochaine ANF
Ingénierie Système, du
11 au 14 octobre à
l'OHP

Action Nationale de Formation CNRS / INSU

Ingénierie système pour les grands instruments scientifiques d'aujourd'hui et demain

Du 11 au 14 octobre 2021
Observatoire de Haute Provence

<https://syseng2021.sciencesconf.org/>

OBJECTIFS :
Former à un public d'ingénieurs et de chercheurs impliqués dans les grands projets actuels et futurs de nos disciplines une maîtrise d'ingénierie système et la connaissance de certains de ses outils spécifiques.

PROGRAMME :

- Les grands projets au CNRS
- Le management et le cycle de vie des projets
- La place de l'ingénierie
- Les défis de l'ingénierie système
- Analyse de besoins et de fonctions
- Architecture système
- Management des interfaces
- Budgets, analyses et suivi de performances
- La traçabilité dans l'ingénierie système
- Flow-down et gestion des spécifications
- Vérification et conformité
- Outils

Inscriptions avant le 21/07/2021

Public :

- Ingénieur ou docteur en recherche, ingénieur ou étudiant, chercheur ou impliqué dans des dispositifs nécessitant la mise en œuvre de l'ingénierie système
- Maximum 15 participants

Pré-requis :

- Expériences de travail sur projet soit ou espace avec responsabilités techniques ou scientifiques
- Bonnes connaissances générales en instrumentation

Notions de prérequis de management de projets

Coût pédagogique pris en charge par l'ANF :

- Agente CNRS : frais de formation, restauration, hébergement en chambre double (sh. simple avec surcoût)
- Agente non-CNRS : frais de formation

Intervenants :

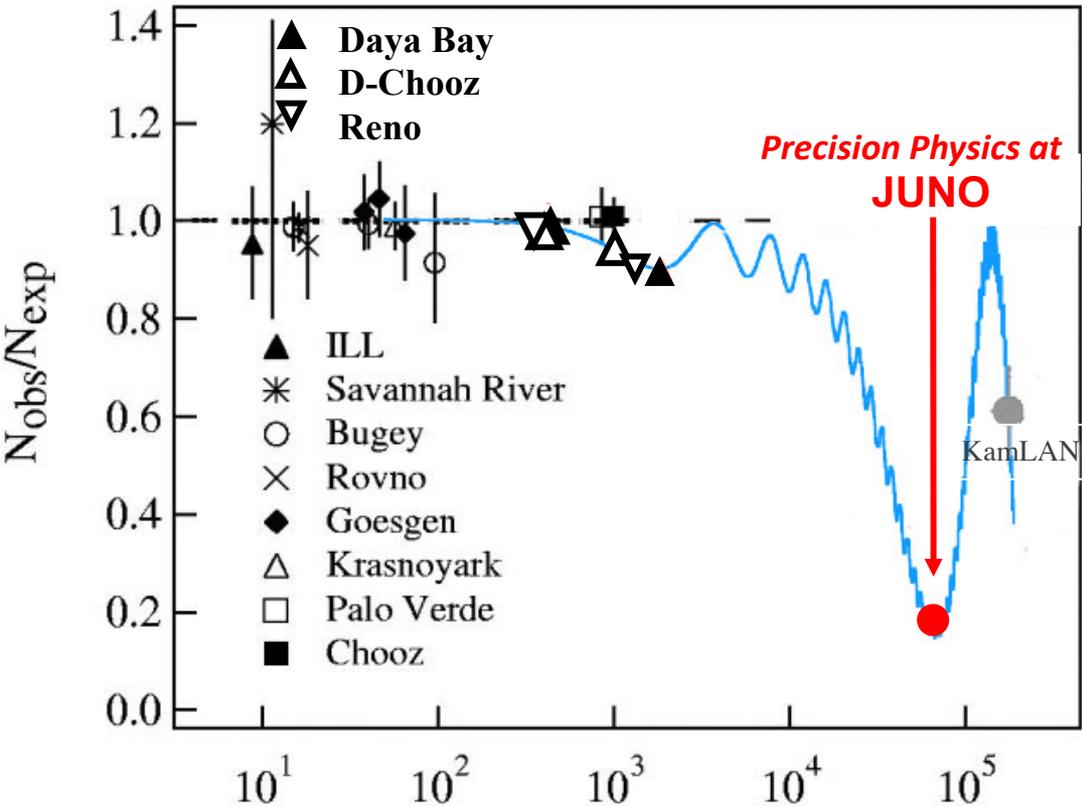
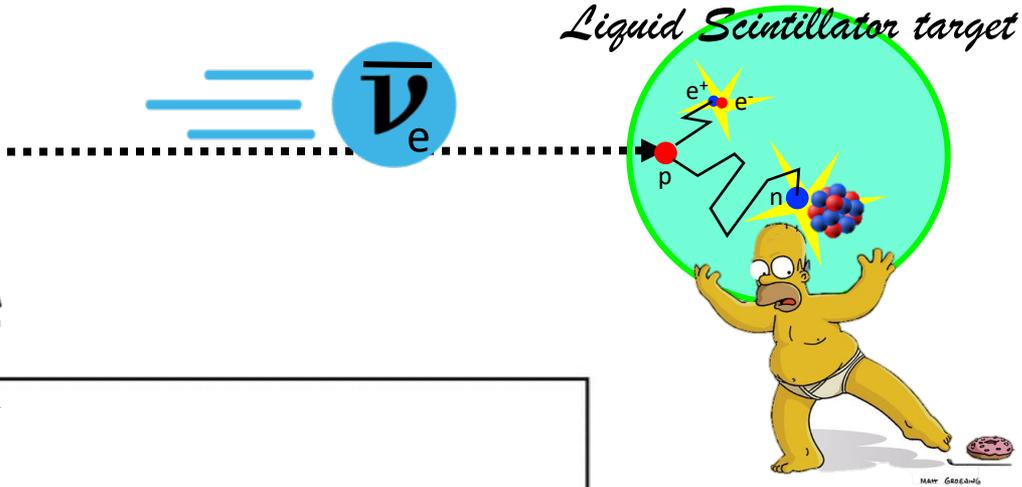
- Karim Daraban (LAM, INSU)
- Daniel Le Mignant (LAM, INSU)
- Cécile Caron (OSIM, INSU)
- Anne Costelle (LAM, INSU)

Responsable : Anne Costelle anne.costelle@lam.fr

Contact administratif et scientifique : Anne Costelle anne.costelle@lam.fr

ANF financé et piloté par la CNRS et le Laboratoire d'Aérodynamique de Marseille, soutenu par le CNRS, l'OSIM et l'INSU

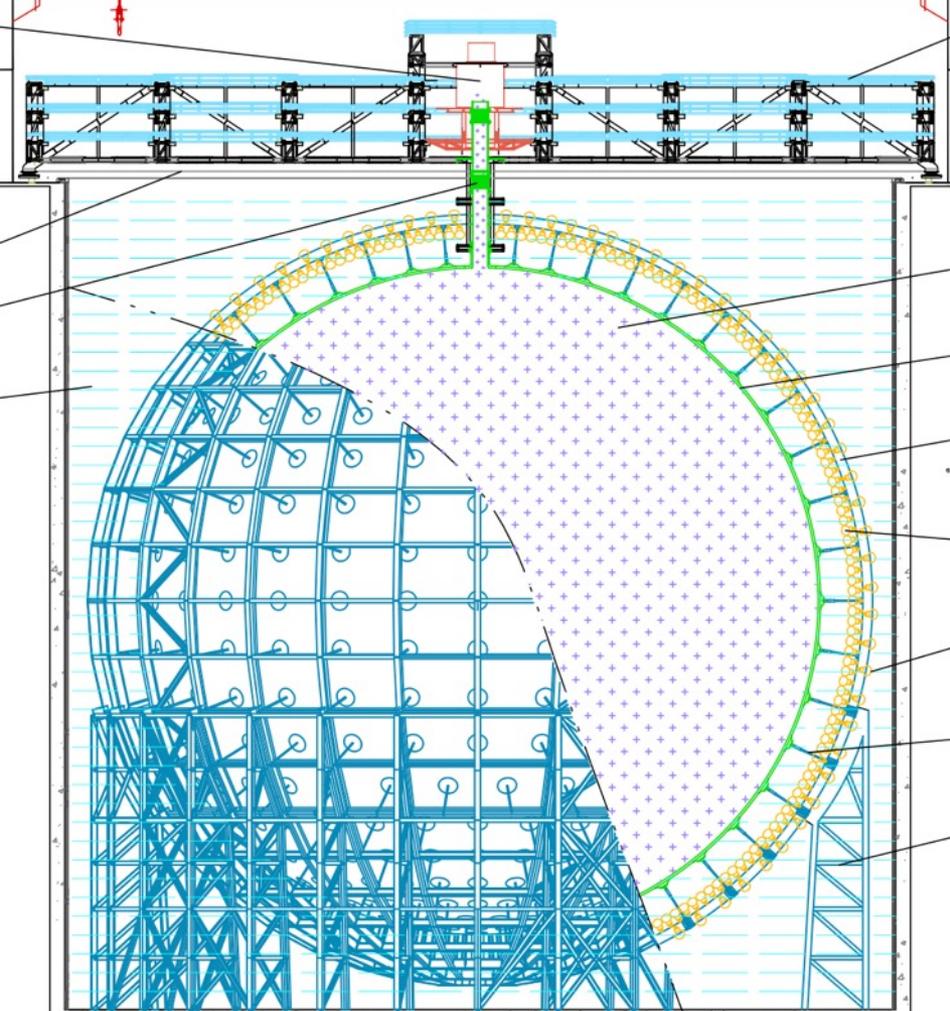
L'expérience JUNO



- ## CHALLENGES INSTRUMENTAUX
- Cible de scintillateur liquide énorme
 - Collection de photons gigantesque
 - Excellente Calibration
 - Contrôle des bruits de fond
 - Cosmiques
 - Radiopureté

JUNO c'est :

The largest Liquid Scintillator & Photocoverage detector in history



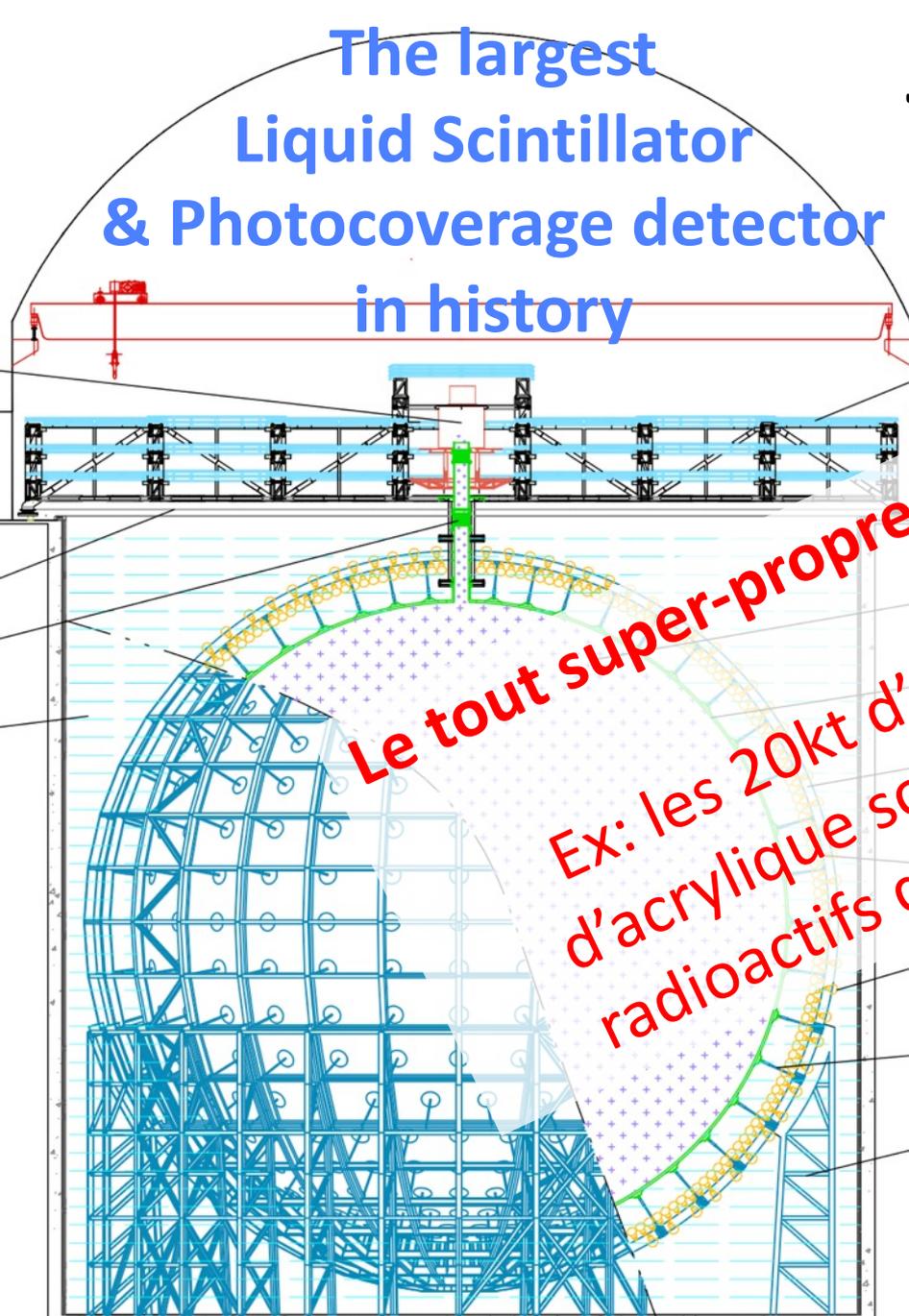
- 20 000 tonnes d'huile ultrapure scintillante (la cible)
- Dans une sphère de 580 tonnes d'acrylique monobloc de 35m de diamètre ultra-transparente
- Scrutée par :
 - 18 000 photomultiplicateur de 50cm de diamètres
 - 26 000 photomultiplicateurs de 7cm de diamètre
 - avec leur câblage et toute leur électronique
- Le tout plongé dans un piscine de 45 000 tonnes d'eau ultra-pure de 40m de profondeur
- Dans une caverne à 700m sous terre
- Dans le Sud de la Chine à 53km d'un complexe de réacteurs nucléaires

JUNO c'est :

The largest
Liquid Scintillator
& Photocoverage detector
in history

- 20 000 tonnes d'huile ultrapure scintillante (la cible)
- Dans une sphère de 580 tonnes d'acrylique monobloc de 35m de diamètre ultra-transparente
- Scrutée par 26 000 photomultiplicateurs de 50cm de diamètre
- 26 000 photomultiplicateurs de 7cm de diamètre avec leur câblage et toute leur électronique
- Le tout plongé dans un piscine de 45 000 tonnes d'eau ultra-pure de 40m de profondeur
- Dans une caverne à 700m sous terre
- Dans le Sud de la Chine à 53km d'un complexe de réacteurs nucléaires

Le tout super-propre radioactivement
Ex: les 20kt d'huile + les 580t d'acrylique sont 200 fois moins radioactifs qu'un corps humain



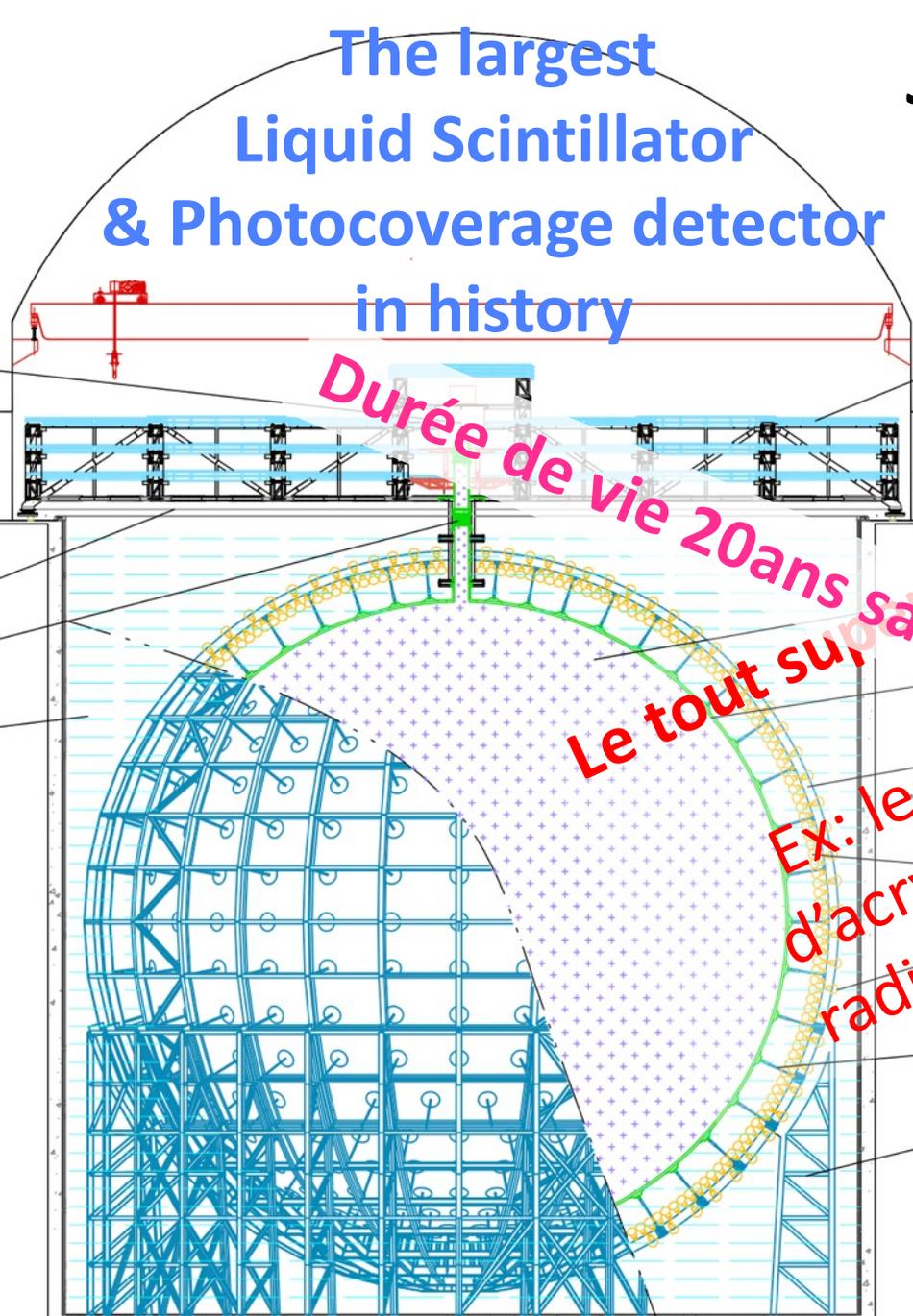
JUNO c'est :

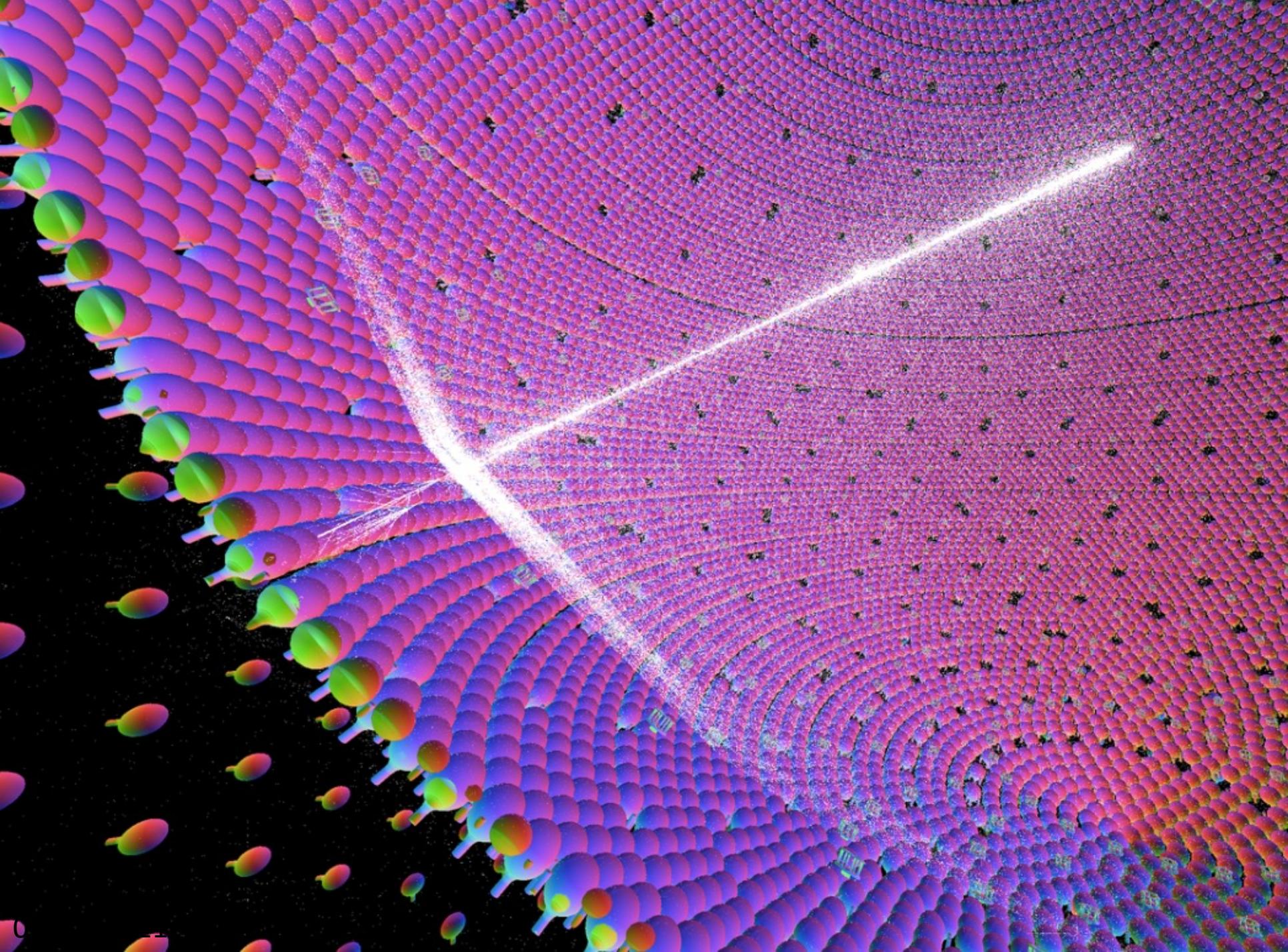
- 20 000 tonnes d'huile ultrapure scintillante (la cible)
- Dans une sphère de 580 tonnes d'acrylique monobloc de 35m de diamètre ultra-transparente
 - constituée par :
 - 18 000 photomultiplicateur de 50cm de diamètres
 - 1000 photomultiplicateurs de 7cm de diamètres
 - avec leur câblage et toute leur électronique
- Le tout plongé dans un piscine de 45 000 tonnes d'eau ultra-pure de 40m de profondeur
- Dans une caverne à 700m sous terre
- Dans le Sud de la Chine à 53km d'un complexe de réacteurs nucléaires

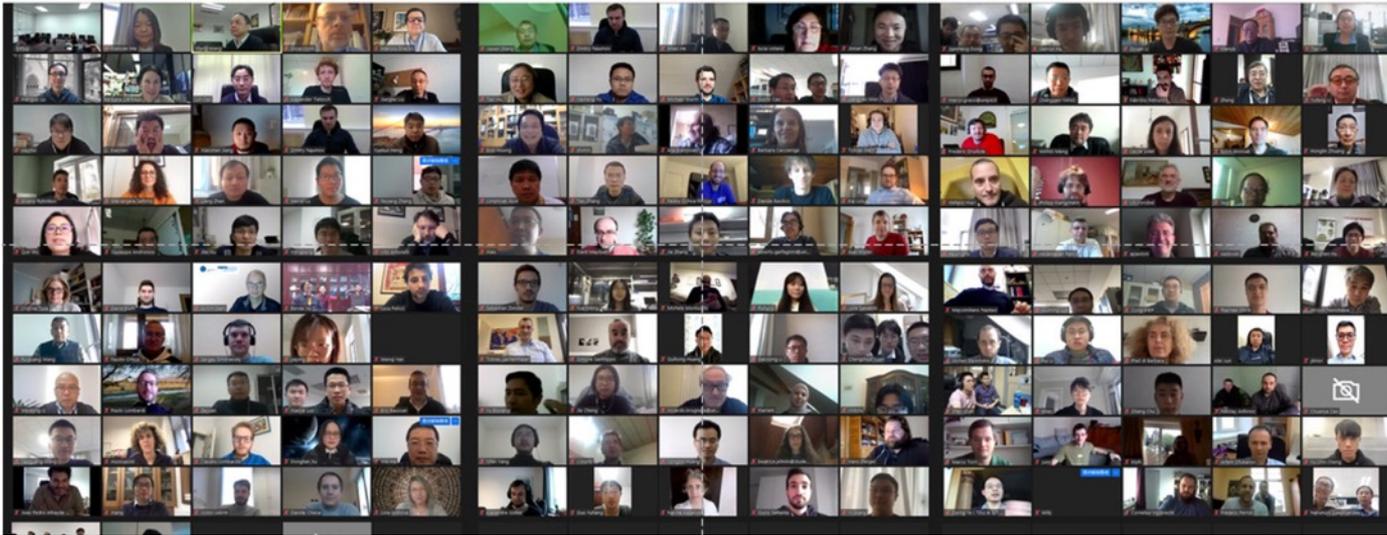
The largest
Liquid Scintillator
& Photocoverage detector
in history

Durée de vie 20ans sans propre radioactivement

Ex: les 20k tonnes d'huile + les 580t d'acrylique sont 10 fois moins radioactifs qu'un corps humain







16 pays

77 institutions

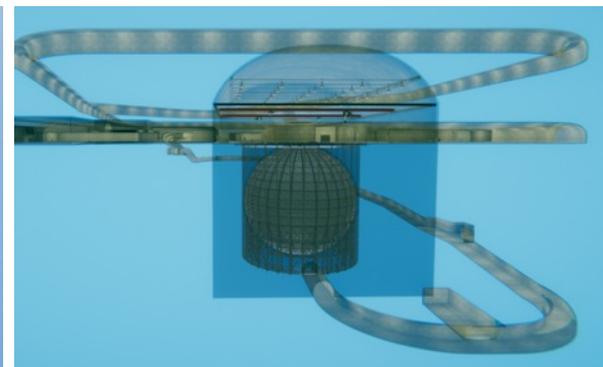
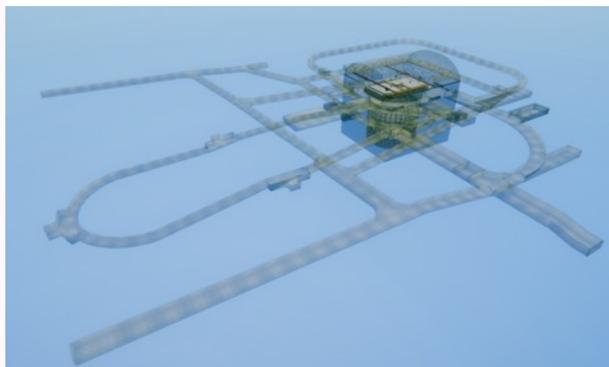
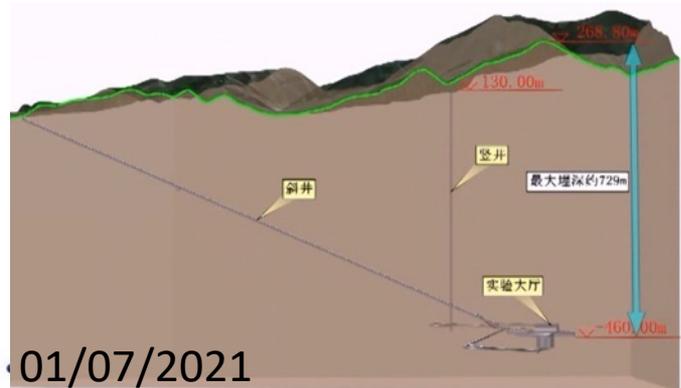
618 membres

Armenia	Yerevan Physics Institute	China	IMP-CAS	Germany	U. Mainz
Belgium	Universite libre de Bruxelles	China	SYSU	Germany	U. Tuebingen
Brazil	PUC	China	Tsinghua U.	Italy	INFN Catania
Brazil	UEL	China	UCAS	Italy	INFN di Frascati
Chile	PCUC	China	USTC	Italy	INFN-Ferrara
Chile	UTFSM	China	U. of South China	Italy	INFN-Milano
China	BISEE	China	Wu Yi U.	Italy	INFN-Milano Bicocca
China	Beijing Normal U.	China	Wuhan U.	Italy	INFN-Padova
China	CAGS	China	Xi'an JT U.	Italy	INFN-Perugia
China	ChongQing University	China	Xiamen University	Italy	INFN-Roma 3
China	CIAE	China	Zhengzhou U.	Latvia	IECS
China	DGUT	China	NUDT	Pakistan	PINSTECH (PAEC)
China	ECUST	China	CUG-Beijing	Russia	INR Moscow
China	Guangxi U.	China	ECUT-Nanchang City	Russia	JINR
China	Harbin Institute of Technology	China	Charles U.	Russia	MSU
China	IHEP	Finland	University of Jyvaskyla	Slovakia	FMPICU
China	Jilin U.	France	LAL Orsay	Taiwan-China	National Chiao-Tung U.
China	Jinan U.	France	CENBG Bordeaux	Taiwan-China	National Taiwan U.
China	Nanjing U.	France	CPPM Marseille	Taiwan-China	National United U.
China	Nankai U.	France	IPHC Strasbourg	Thailand	NARIT
China	NCEPU	France	Subatech Nantes	Thailand	PPRLCU
China	Pekin U.	Germany	FZJ-ZEA	Thailand	SUT
China	Shandong U.	Germany	RWTH Aachen U.	USA	UMD1
China	Shanghai JT U.	Germany	TUM	USA	UMD2
China	IGG-Beijing	Germany	U. Hamburg	USA	UC Irvine
China	IGG-Wuhan	Germany	FZJ-IKP		

Le laboratoire JUNO en surface



Le laboratoire JUNO souterrain



La plateforme d'installation



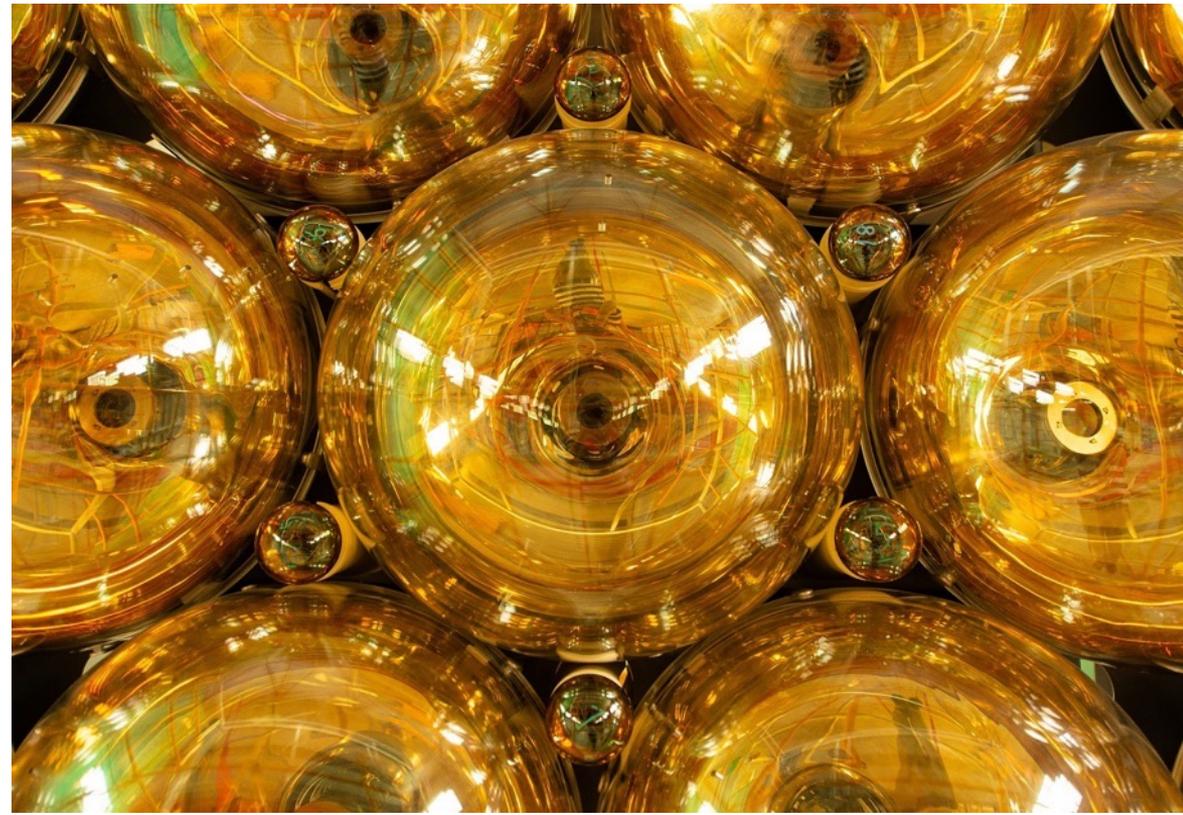
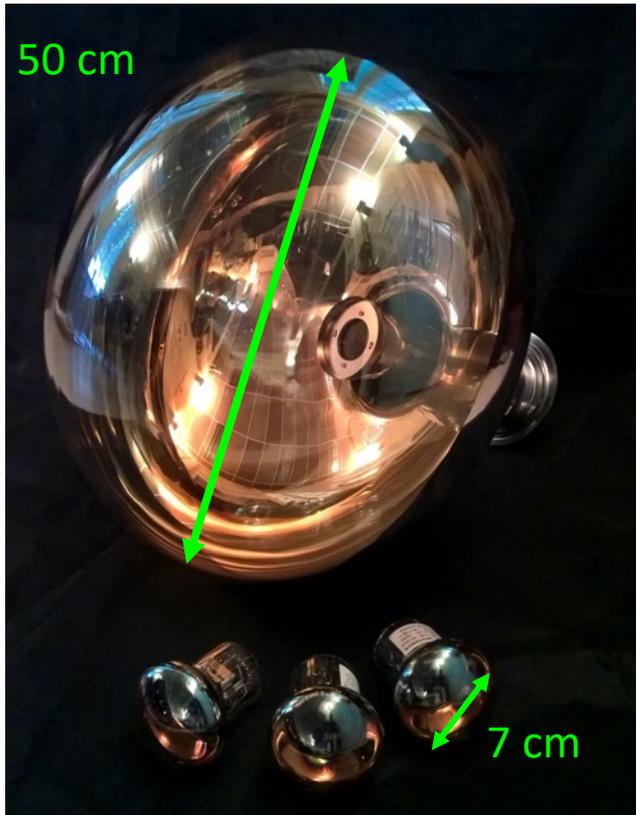
Production des photomultiplicateurs



La plus grande production de photomultiplicateurs de l'histoire



2 systèmes de détection intriqués



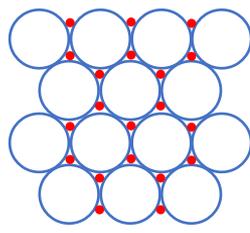
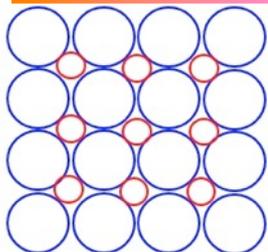
2012

2014

2016

2018

2021



Approuvé
dans JUNO

Début des
productions

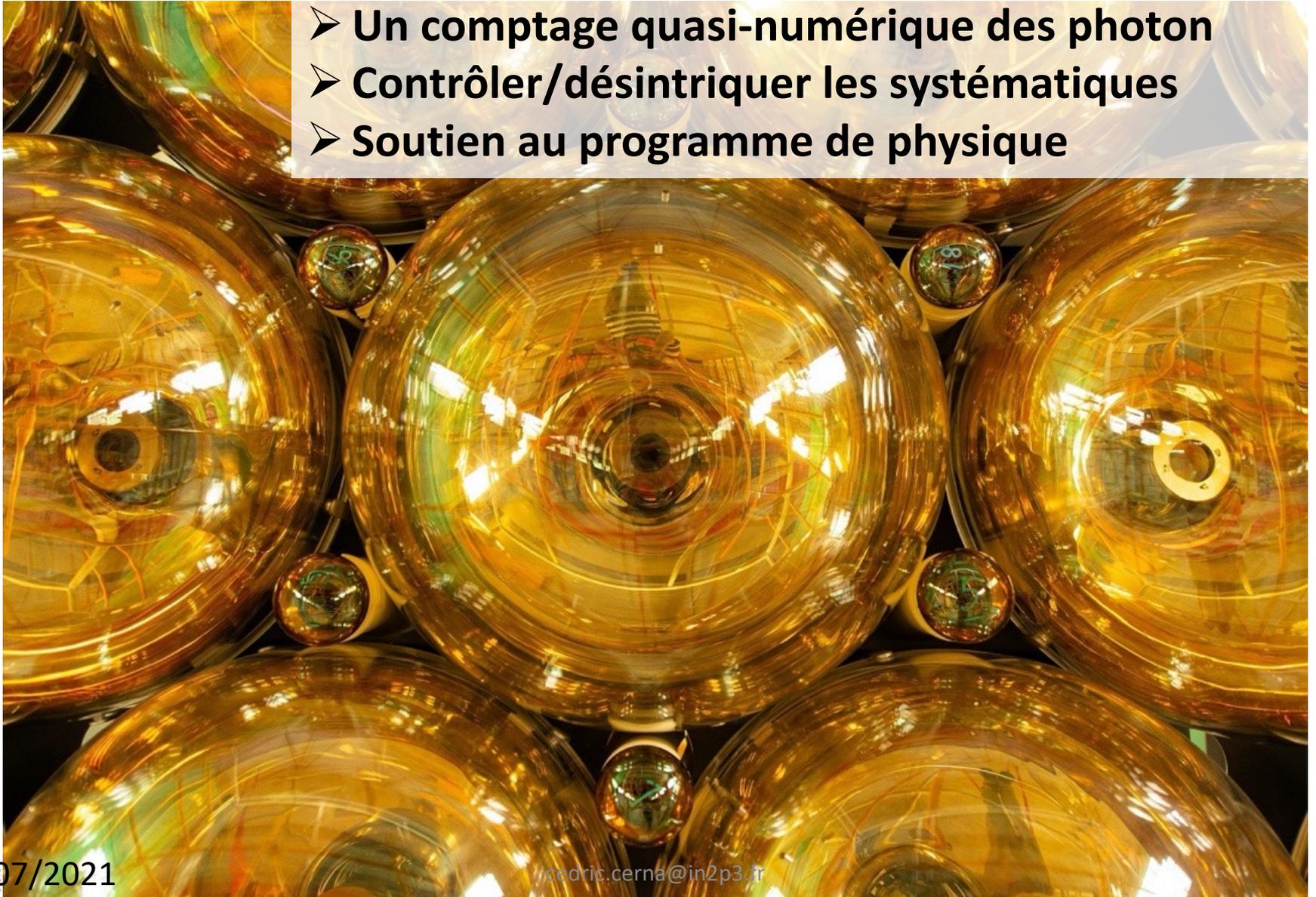
Livraison pour
intégration

➤ Très peu de temps de développement pour s'insérer dans un design déjà existant

JUNO photomultiplicateurs

Le système Small PMT (SPMT)

- Un comptage quasi-numérique des photons
- Contrôler/désintriquer les systématiques
- Soutien au programme de physique



Design

- easy to produce
- easy to test
- easy to integrate
- easy to install

Industrie

26,000 channels

- Photomultipliers
- Readout electronics
- Cabling



Consortium/Experience

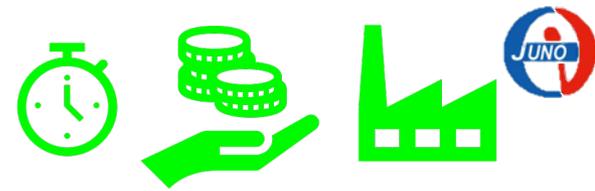


Chapitre 1

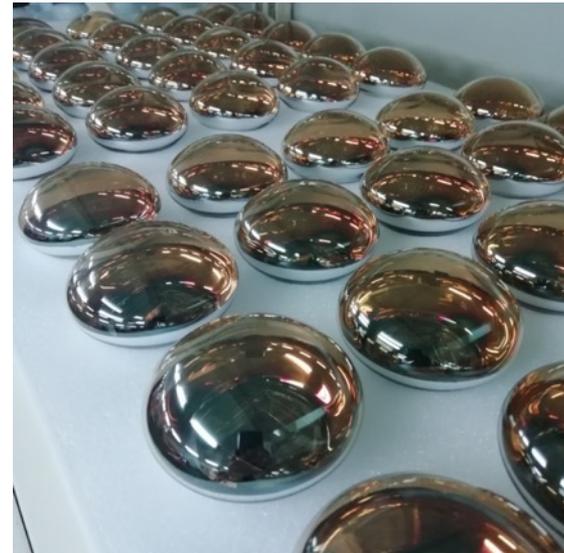
Les Grands Problèmes d'abord

- 26 000 Photomultiplicateurs 3''
- 26 000 voies de lecture électronique
- [livrer - inventer] < 5 ans 
- Coût < qq % de l'expérience 
- Manpower inexistant

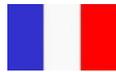
26000 photomultiplicateurs, un problème industriel



2016	Négociations intenses avec 3 fabricants
2017	AO/Contrat → HZC Chine
Janvier 2018	Production kickoff → 1 000 PMT/mois
Janvier 2020	26 000 photomultiplicateurs produits



➤ Fait à HZC sous supervision de JUNO

- 100% testé chez le fabricant → 10% vérifié aléatoirement par JUNO
- 100% acceptance par JUNO (acceptance) 

Electronique de lecture : 26 000 voies



L'ASIC CATIROC



- En mode Single Photo-electron on a seulement besoin de mesurer la charge et le temps
- Sans trigger
- 16 voies/ASIC → 1600 ASICs

CATIROC: an integrated chip for neutrino experiments using photomultiplier tubes

JUNO Collaboration • Selma Conforti (Ec. Polytech., OMEGA) et al. (Nov 27, 2020)

Published in: JINST 16 (2021) 05, P05010 • e-Print: 2012.01565 [physics.ins-det]

CATIROC: an integrated chip for neutrino experiments using photomultiplier tubes

Selma Conforti^{a,*} Mariangela Settimo^{b,**} Cayetano Santos^c Clément Bordereau^d Anatael Cabrera^{e,f} Stéphane Caillier^d Cédric Cerna^d Christophe De La Taille^d Frédéric Drullollet^d Frédéric Dulucq^d Victor Lebrin^b Frédéric Lefèvre^b Gisèle Martin-Chassard^d Frédéric Perrot^d Abdel Rebi^d Louis-Marie Rigalleau^b Nathalie Seguin-Moreau^d
on behalf of JUNO collaboration

^a OMEGA, Ecole Polytechnique-CNRS/IN2P3, Paris, France

^b SUBATECH, IMT Atlantique, Université de Nantes, CNRS-IN2P3, Nantes, France

^c Astro-Particle Physics Laboratory, CNRS/CEA/Paris7/Observatoire de Paris, Paris, France

^d Univ. Bordeaux, CNRS, CENBG, UMR 5797, F-33170 Gradignan, France

^e ICLab, Université Paris-Saclay, CNRS/IN2P3, 91405 Orsay, France

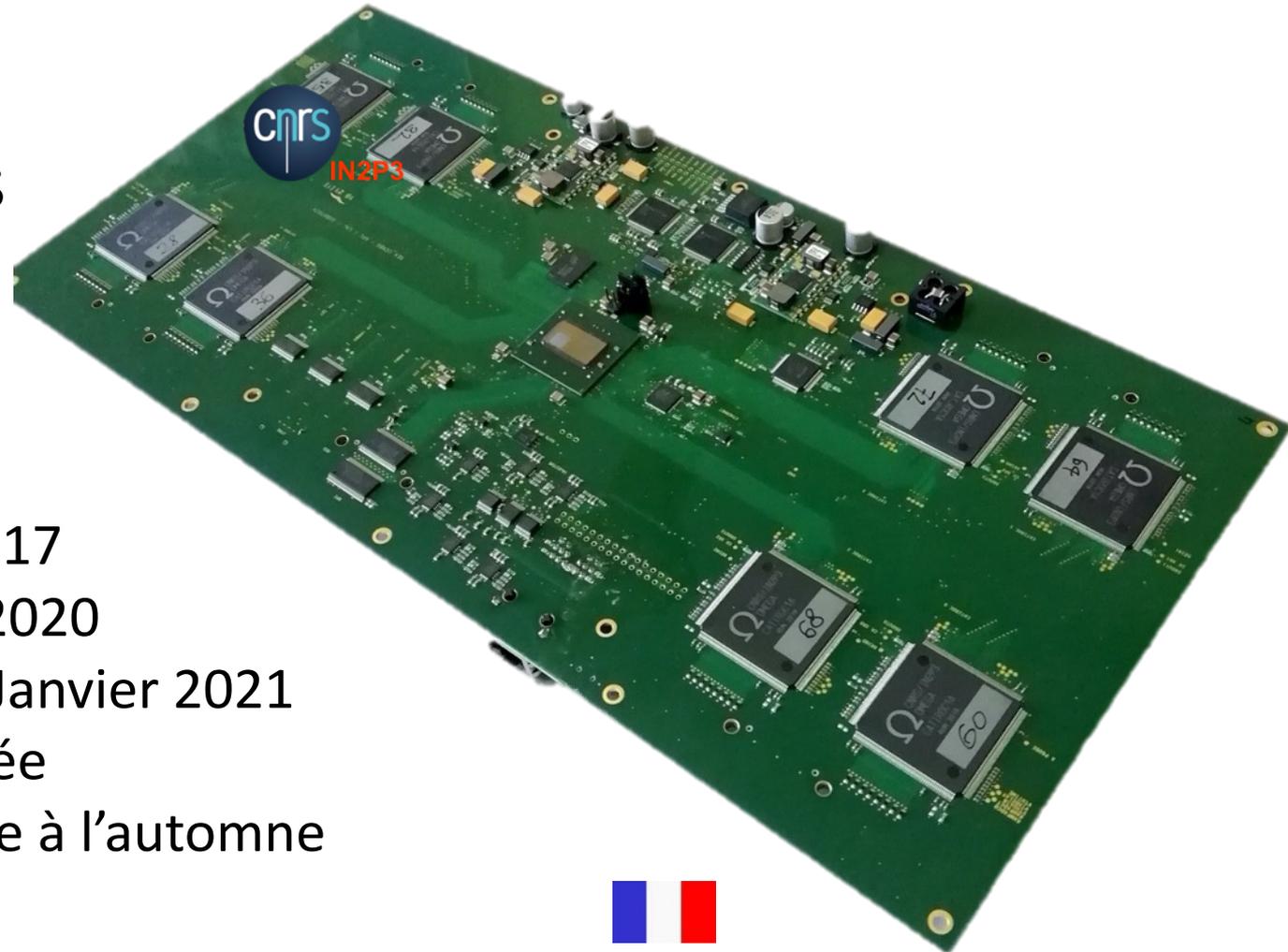
^f LNCA Underground Laboratory, IN2P3/CNRS - CEA, Chooz, France

E-mail: conforti@omega.in2p3.fr, settimo@subatech.in2p3.fr

ABSTRACT: An ASIC (Application Specific Integrated Chip) named CATIROC (Charge And Time Integrated Read Out Chip) has been developed for the next-generation neutrino experiments using a large number of photomultiplier tubes (PMTs). Each CATIROC provides the time and the charge measurements for 16 configurable input channels operating in auto-trigger mode. Originally designed for the light emission in water Cherenkov detectors, we show in this paper that its use can be extended to liquid-scintillator based experiments. The ~ 26000 3-inch PMTs of the JUNO experiment, under construction in China, is a case in point. This paper describes the features of CATIROC with a special attention to the most critical points for its application to the time profile of the light emission in liquid scintillators. The achieved performances in both charge and time measurements can be inputs for future high-precision experiments making use of PMTs or other photo-sensitive detectors.

La carte de lecture front-end ABC

- Le livrable français sur SPMT
- ❖ 8 ASICs CATIROC = $8 * 16 = 128$ channels
- ❖ FPGA K7
- ❖ DDR3 1GB
- ❖ FirmWare IPBUS



- 1^{er} prototype 2017
- 3^{ème} Prototype 2020
- Pré-production Janvier 2021
- Production lancée
- Livrable en Chine à l'automne



Chapitre 2

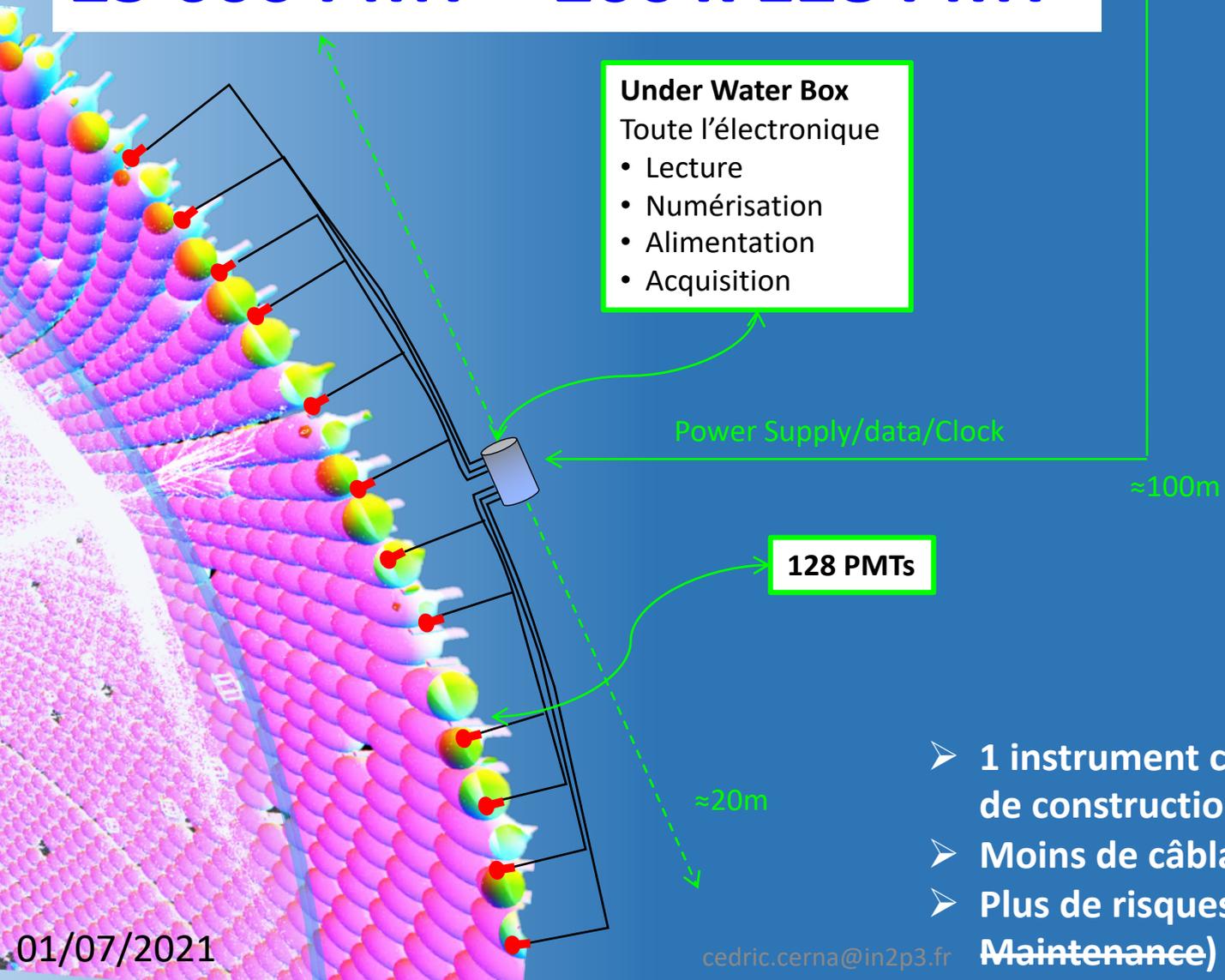
Tous les autres problèmes qui peuvent faire échouer ce projet

- Design
- Interfaces
- Câblage
- Fiabilité

SPMT : Choix de Design

Surface Electronique

25 600 PMT = 200 x 128 PMT



Under Water Box
Toute l'électronique

- Lecture
- Numérisation
- Alimentation
- Acquisition

Power Supply/data/Clock

=100m

128 PMTs

=20m

- 1 instrument complexe → 200 briques de construction plus simples
- Moins de câblage vers la surface
- Plus de risques sous l'eau (fiabilité ! / **Maintenance**)

Design et Organisation pour 1 brique

Sur étagère
Mais production longue



3" PMT

La clef des interfaces
Mais à développer vite



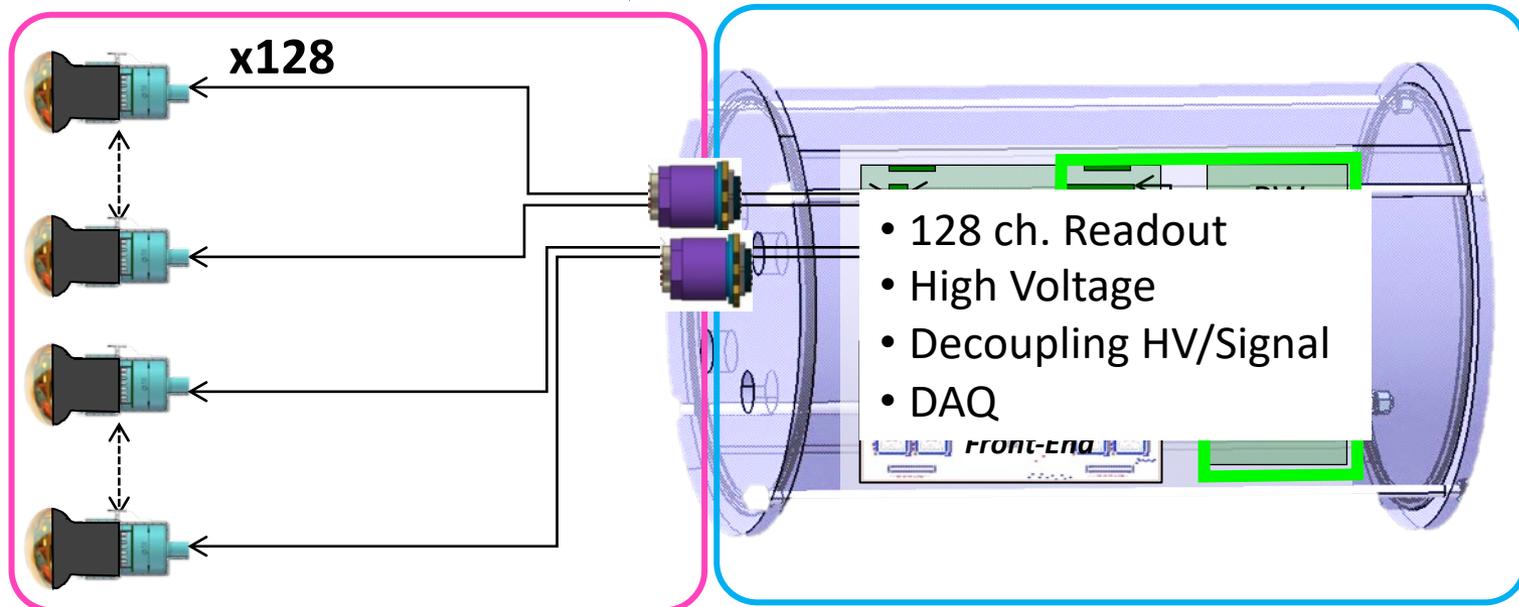
Cable Connector

Under Water Box
Electronics

Le Coeur de lecture



Mais toutes les
cartes électronique
et l'intelligence à
développer

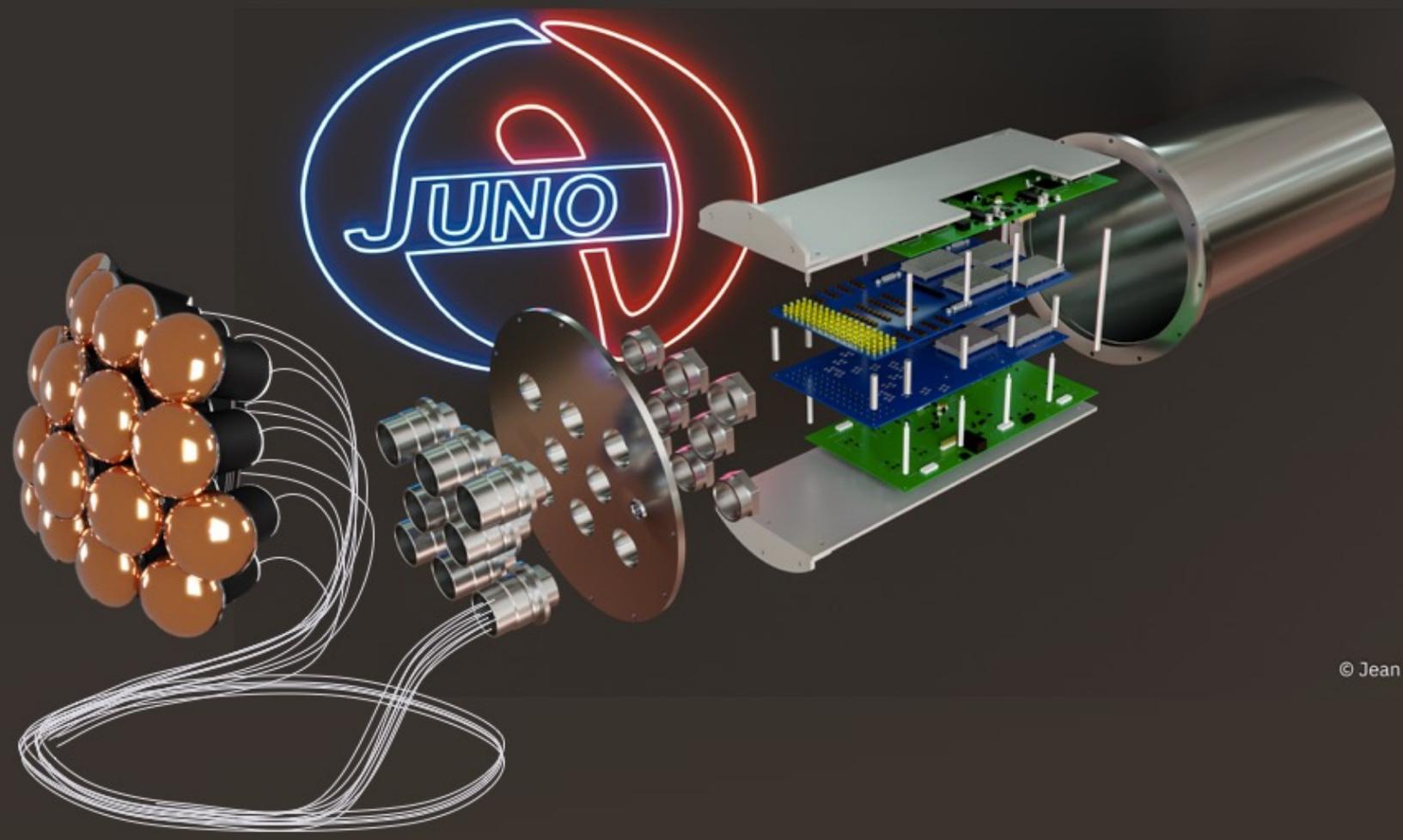


PMT instrumentation et Electronique sont conçus et produits en décalage temporel, testés séparément puis installés ensemble sur JUNO

01/07/2021 → IL FAUT UNE INTERFACE FIABLE ENTRE LES DEUX

La grande différence entre les systèmes uniques et ceux en série

© Jean Jouve



© Jean Jouve

1. La boîte de jonction électronique sous-marine



2. Le câblage sous-marin

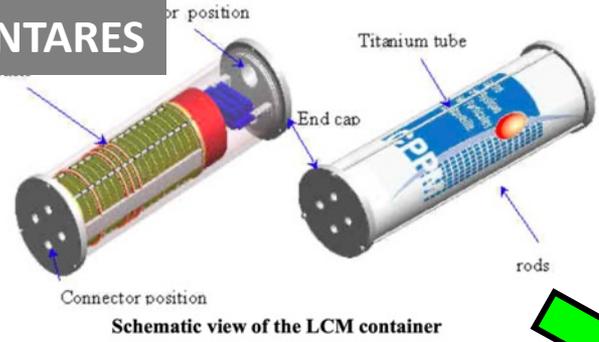
3. Les bancs de tests et calibration électronique

L'Under-Water Box

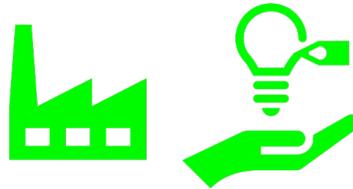


- ❖ Interface électronique
 - Interface électrique
 - Interface Mécanique
 - Interface Thermique
- ❖ Fiabilité

ANTARES

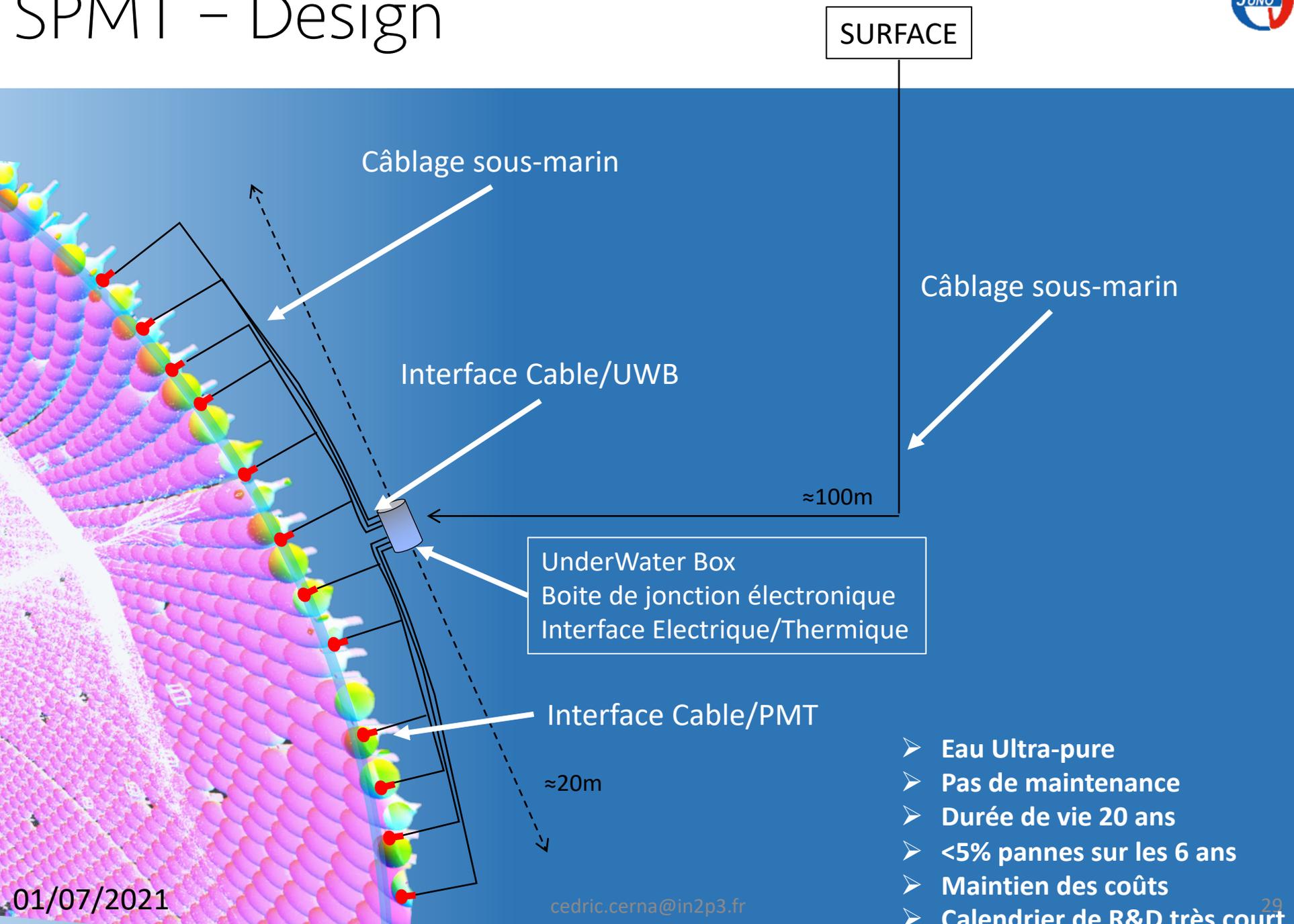


1. La boîte de jonction électronique sous-marine
2. Le câblage sous-marin



3. Les bancs de tests et calibration électronique

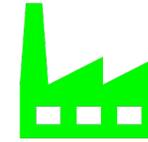
SPMT – Design



- Eau Ultra-pure
- Pas de maintenance
- Durée de vie 20 ans
- <5% pannes sur les 6 ans
- Maintien des coûts
- Calendrier de R&D très court

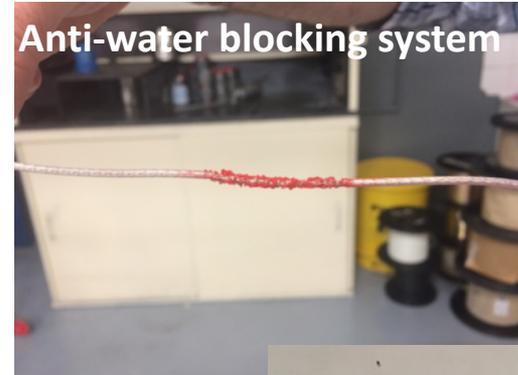
Câble RF sous-marin *axon'*

- Transport de la Haute Tension
- Transport des signaux RF analogiques de faible maplitude
- Taille minimale
- 20 ans dans l'eau ultra-pure sans pollution
- Radio-pure



Axon Custom RG178

- Jacket HDPE 2.1mm diam.
- Anti-water blocking system
- 50 Ohms / RF
- Atténuation 1.6 dB/m @ 1GHz
 - → 11% de perte de charge sur un SPE
- 1600 VDC garantie
- 200 km de câble produit pour JUNO SPMT



R&D Axon France et CENBG

2017



Production Axon China et IHEP

2020



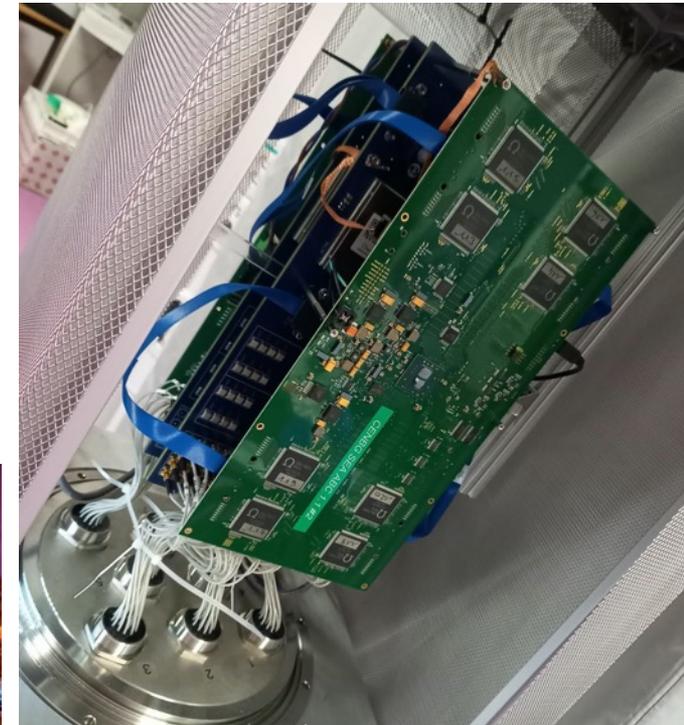
1. La boîte de jonction électronique sous-marine
2. Le câblage sous-marin
3. Les bancs de tests et calibration électronique



Bancs de T&V et calibration électronique



- Reproduire un noeud complet SPMT
- Préparer le HW très en avance avec des specs en évolution
- Préparer l'intégration de tous les sous-systems avec un calendrier très mouvant
- Etre prêt au moment de la production



SPMT un système qui ne dort jamais



FRANCE
cnrs
IN2P3



CHINA
CERN
ICNP



USA
UCI
CHILE
PUC



SPMT dans JUNO

Les doutes

- Le système est en production
- Que donnerons les performances en integration, assemblage, commissioning, operation ?
encore de bonnes nuits en perspective ...

Aurait pu mieux faire

- Des erreurs de management initiales : l'agilité ne doit pas permettre de sauter certaines étapes clefs
 - Formaliser le "qui fait quoi"
 - Formaliser la separation des pouvoirs : management / ingénierie
 - Rôle plus fort des agences
- Techniquement
 - Une meilleure circulation des informations sur les specs initiales auraient pu conduire à une meilleure adaptation de l'ASIC de lecture
 - Un Regret sur la responsabilité de la production du câblage avec la bascule France → Chine

SPMT dans JUNO

Les réussites (jusque là)

- Un système complexe
- Très peu de temps de développement pour s'insérer dans un design déjà existant
- Un consortium « agile »
- Un design initial très orienté par la production et l'intégration
- Un appuis industriel très fort
- Beaucoup d'expérience académique