



Emergence de communautés énergétiques

Exemple d'une Infrastructure de Recherche Grenobloise

François Debray

Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses (LNCMI-Grenoble)

Infrastructures de Recherche ?

« 99 Infrastructures de Recherche (IR) au bénéfice de l'ensemble de la communauté scientifique. »

« Des chercheurs de toutes les disciplines ont accès, dans des environnements de très haut niveau, aux équipements les plus performants pour mener des recherches de grande ampleur dans des domaines de pointe »

Exemples :

Réacteur à Neutrons (ILL),
Synchrotrons (ESRF, Soleil),
[Laboratoire des Champs Magnétiques Intenses \(LNCMI\)](#),
Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL),
Flotte Océanographique Française (FOF),
Grand Equipement National de Calcul Intensif (GENCI),
Données pour les sciences sociales (PROGEDO)
Aboraroie eruropéen de Biologie moléculaire (EMBL)

...

Uniquement quelques interactions fondamentales dans l'univers

Interactions

Forte

Faible

Electromagnétique

Gravitationnelle

Domine dans :

Noyau atomique

Désintégration radioactive

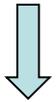
Électrons entourant le noyau

Astres

Recherches sous champs magnétiques Intenses

Effets dynamiques de B

Astrophysique,
Geophysique,
Matière noire,
Nature de la turbulence

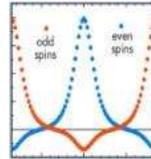


Exemples

Dimensions de la turbulence
Modélisation du cœur terrestre
Aflven waves, Axion

Utilisation thermodynamiques du B

Metaux, Supraconducteurs
Semi-conductors
Materiaux Magnétiques
Nanophysique



Exemples

Supraconductivité
Field Induced Supercond.
Quantum Critical Phase
Magnetization Plateau

Méthodes de mesures

Chimie
Biochimie
Physique



Exemples

Imagerie et RMN , Cyclotron Resonance, Electron Spin Resonance (ESR) (X)MCD, Hall effect, dHvA effect, SdH effect,....

Manipulations de la matiere

Metallurgie
Hydrodynamique
Electrochimie



Exemples

Levitation
Separation, alignment
Control (convection / diffusion)
Phase transformation

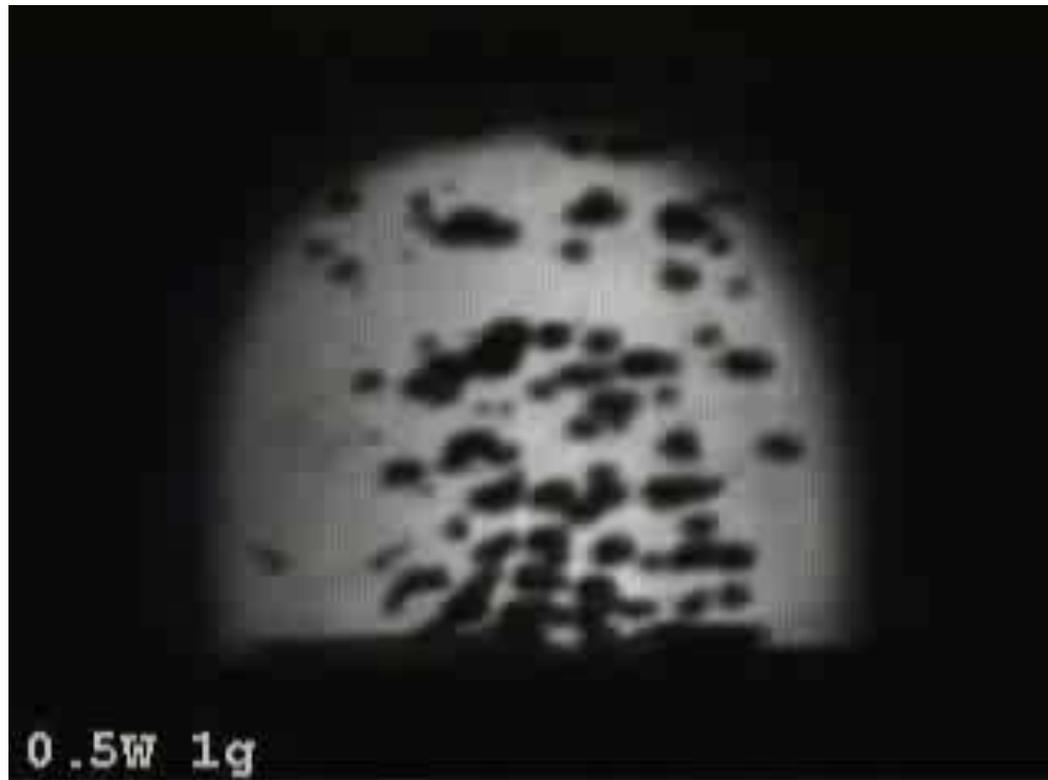
Natures des champs magnétiques demandés :

- Champs intenses continus dans un volume le plus grand possible
- Connaissances des variations de champs magnétiques dans l'espace.

Exemple particulier

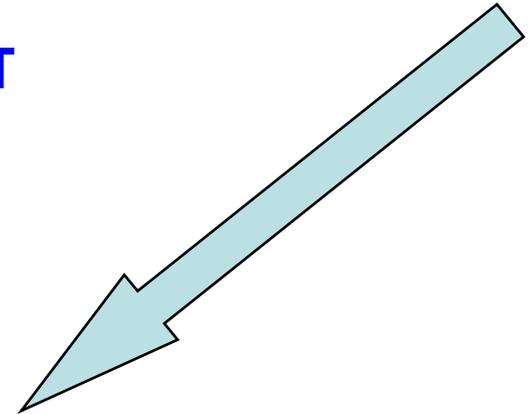
Force électromagnétique = force de gravitation

→ Lévitation

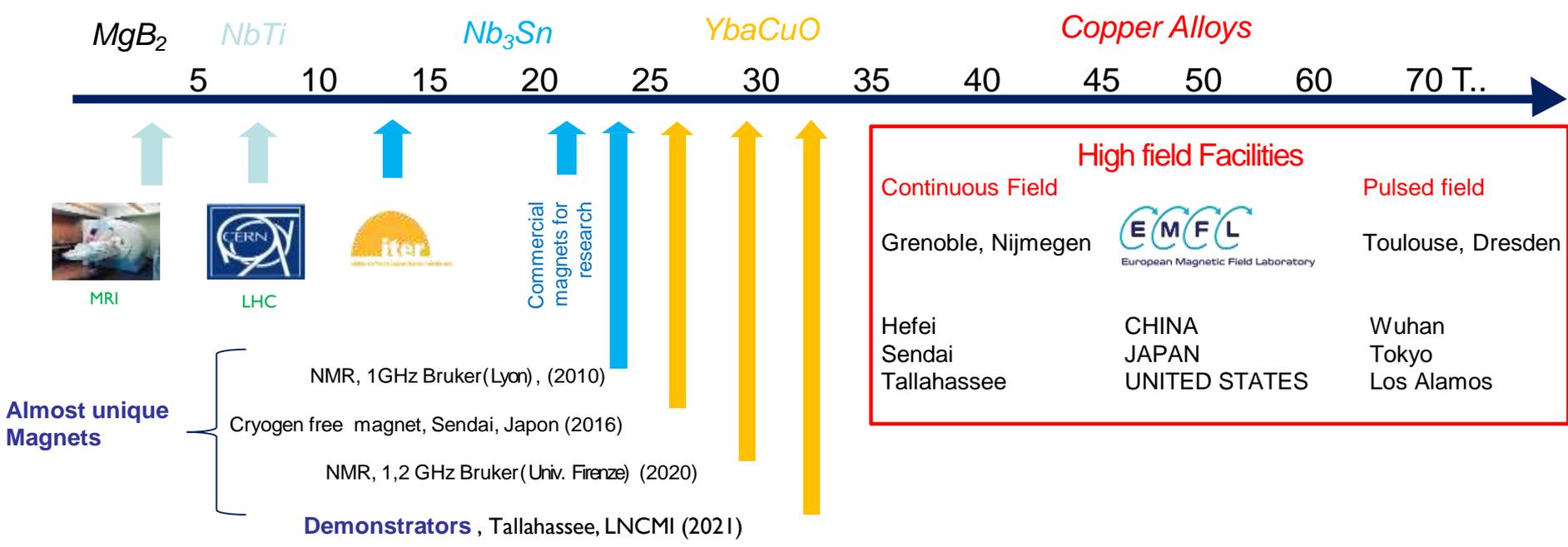


Intensité de champs magnétiques

Dans le cerveau	$\sim 10^{-15}$ T
Sur la terre	$\sim 5 \cdot 10^{-5}$ T
Imagerie médicale	~ 3 T
Séparation magnétique	~ 5 T
Grands Aimants pour la recherche (ITER, LHC)	~ 20 T
<i>Champs magnétiques continus en labo</i>	~ 40 T
Champ magnétique pulsé en labo	100 T
Etoiles blanches magnétiques	10 000 T
Pulsar	100 000 000 T



Etat de l'Art des Champs magnétiques Intenses

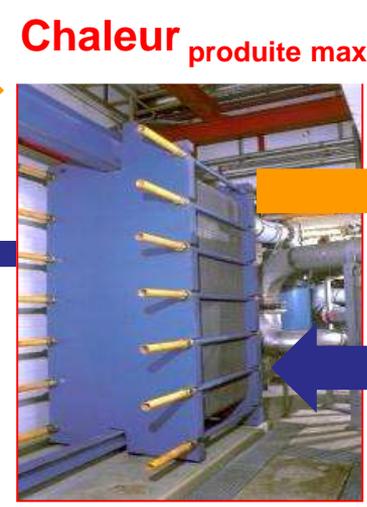
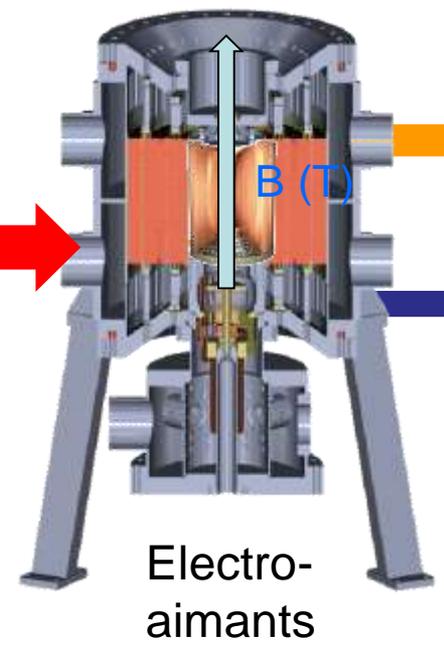
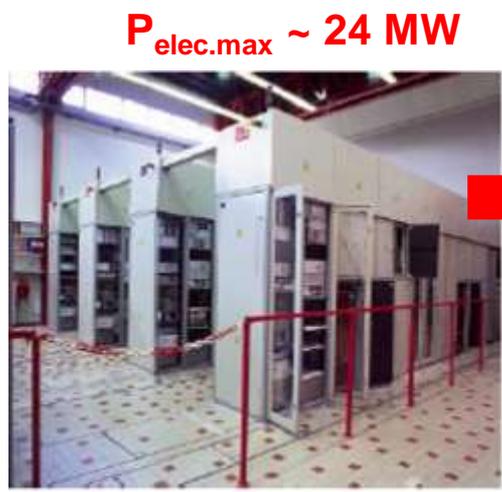
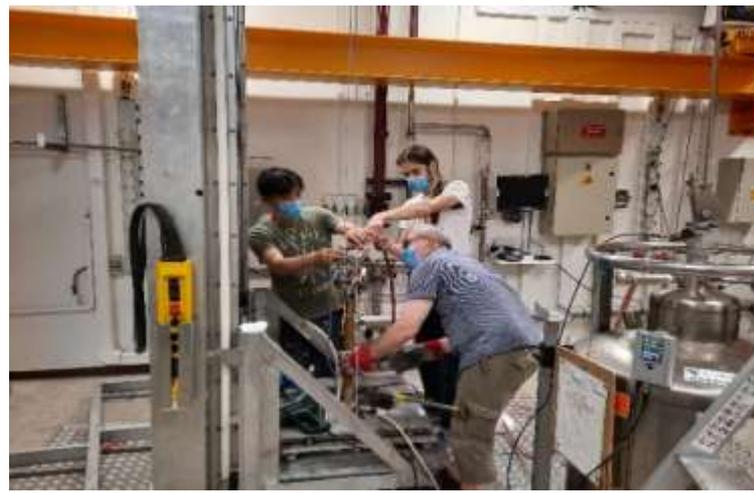


Almost unique Magnets

High field Facilities

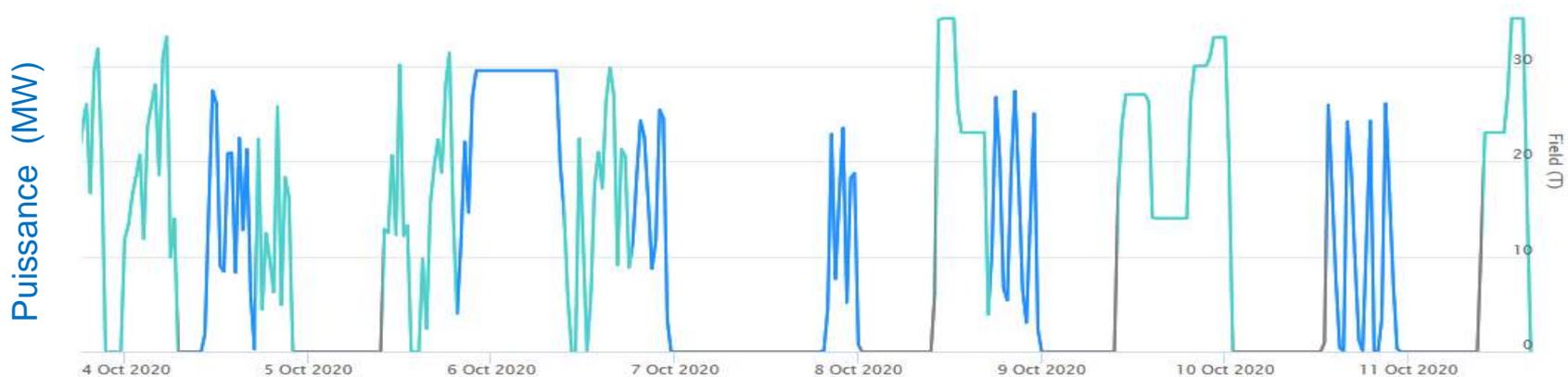
Continuous Field		Pulsed field
Grenoble, Nijmegen	 European Magnetic Field Laboratory	Toulouse, Dresden
Hefei Sendai Tallahassee	CHINA JAPAN UNITED STATES	Wuhan Tokyo Los Alamos

Production de champs magnétiques pour les utilisateurs



SPÉCIFICITÉ DU FONCTIONNEMENT DU LNCMI

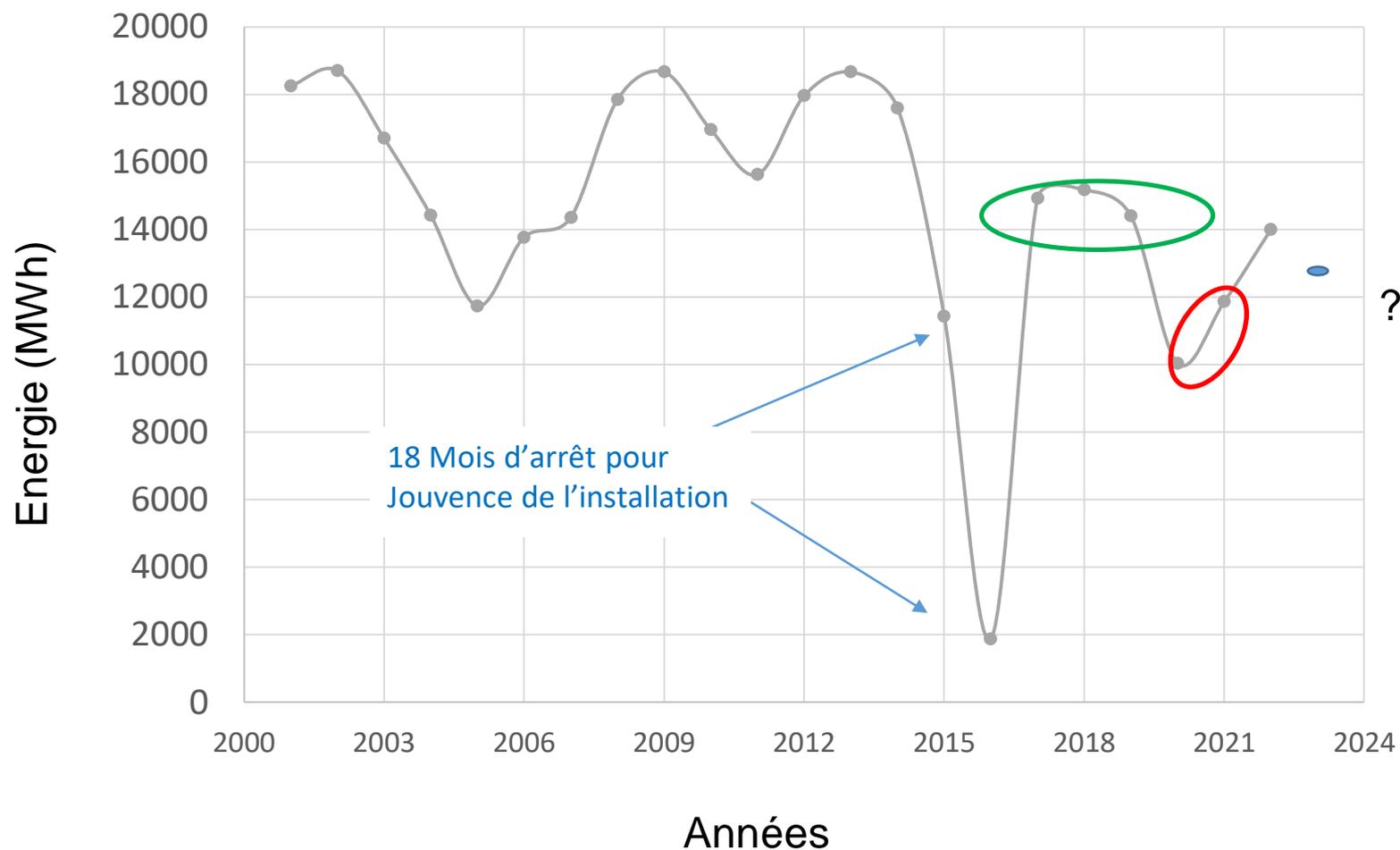
- Utilisation caractérisée par de très fortes intermittences
- C'est l'utilisateur-chercheur qui définit l'empreinte énergétique du laboratoire



La temporalité est fixée par le chercheur-utilisateur :

- nécessité d'une démarche inclusive,
- introduction d'une dimension sociale

Energie pour champs magnétiques intenses à Grenoble (MWh) : statistique



Voies développées pour la gestion de l'énergie au LNCMI

1- Monodisciplinaire

- Matériaux & Thermohydraulique - 5 %

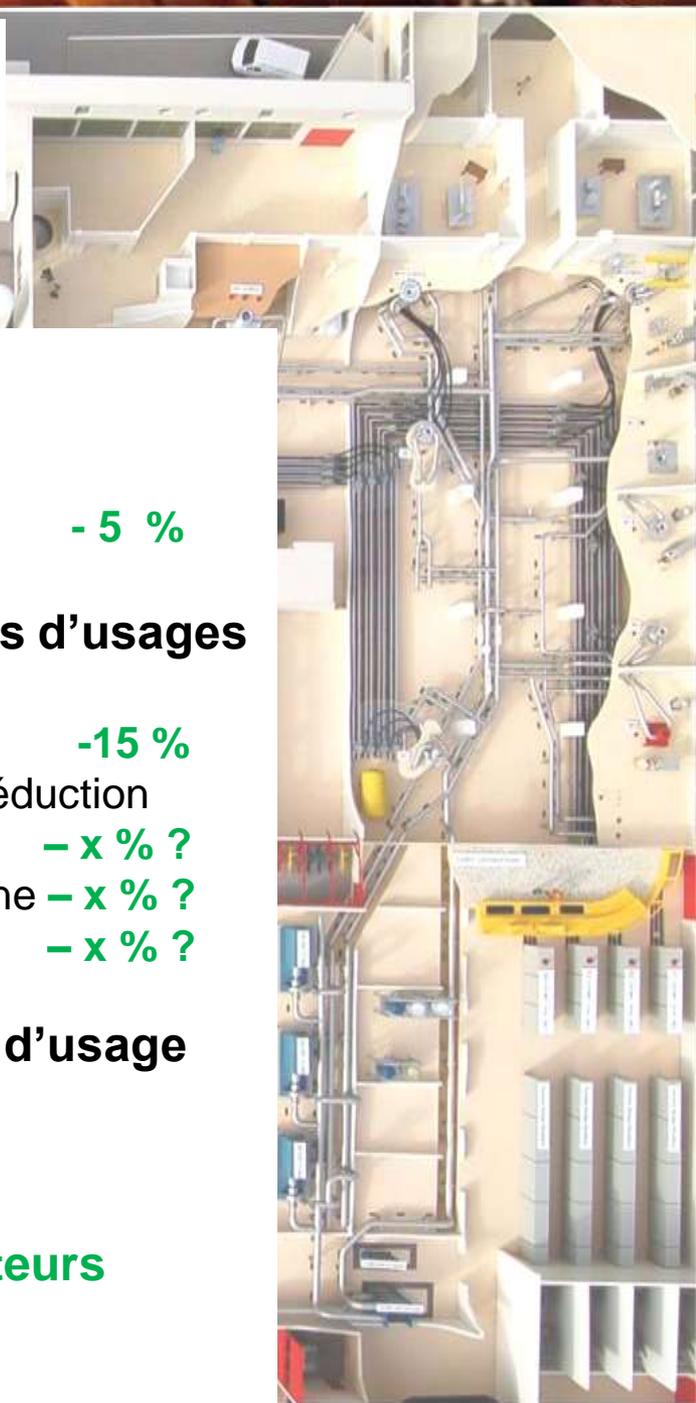
2- Monodisciplinaire avec changements d'usages

- Pilotage indépendant des sous aimants -15 %
- Pilotage rapide du champ permettant une réduction des temps de mesures → en dévelpt. - x % ?
- Aimant hybride avec supraconducteur externe - x % ?
Aimant tout supraconducteur > 30 T ~2027 - x % ?

3- Pluridisciplinaires avec changement d'usage

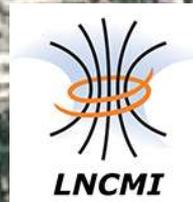
- Valorisation des calories
- Services au réseau électrique

**Implication croissante des utilisateurs
...et changements de périmètres !**



3 grandes infrastructures de recherche en bout de presqu'île" de Grenoble

Refroidies par la rivière DRAC
→ pas de frigo ni de tours de refroidissements



6th Workshop
Energy for
Sustainable
Science
at Research Infrastructures

<https://indico.esrf.fr/event/2/timetable/#2020929.detailed>

Le refroidissement est critique à Grenoble : Drac & Isère



Pluridisciplinaires avec changement d'usages: valorisation des calories

2024 opération sur le périmètre du campus CNRS de la presqu'île
2025-26 connection directe sur le réseau de chauffage grenoblois

Elargissement du nombre de partenaires

→ G2Elab, LITEN, Compagnie de Chauffage, service de gestion du patrimoine du CNRS, utilisateurs du LNCMI..



Projet de valorisation des calories du LNCMI tel qu'étudié pour l'avant projet GREAT

LNCMI en 2022

Energie annuelle de 15 GWh (~ 3 000 foyers électriques)

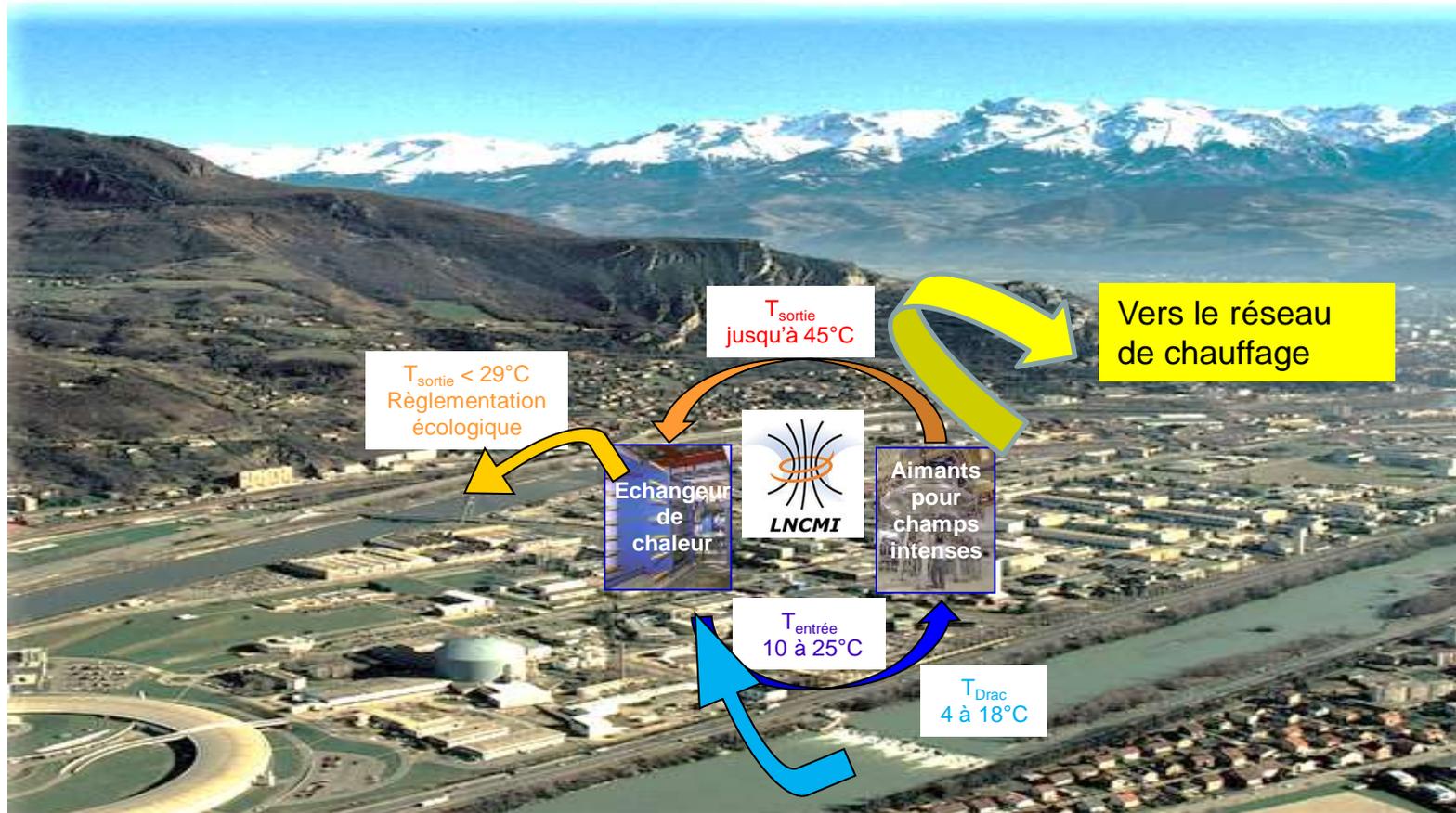


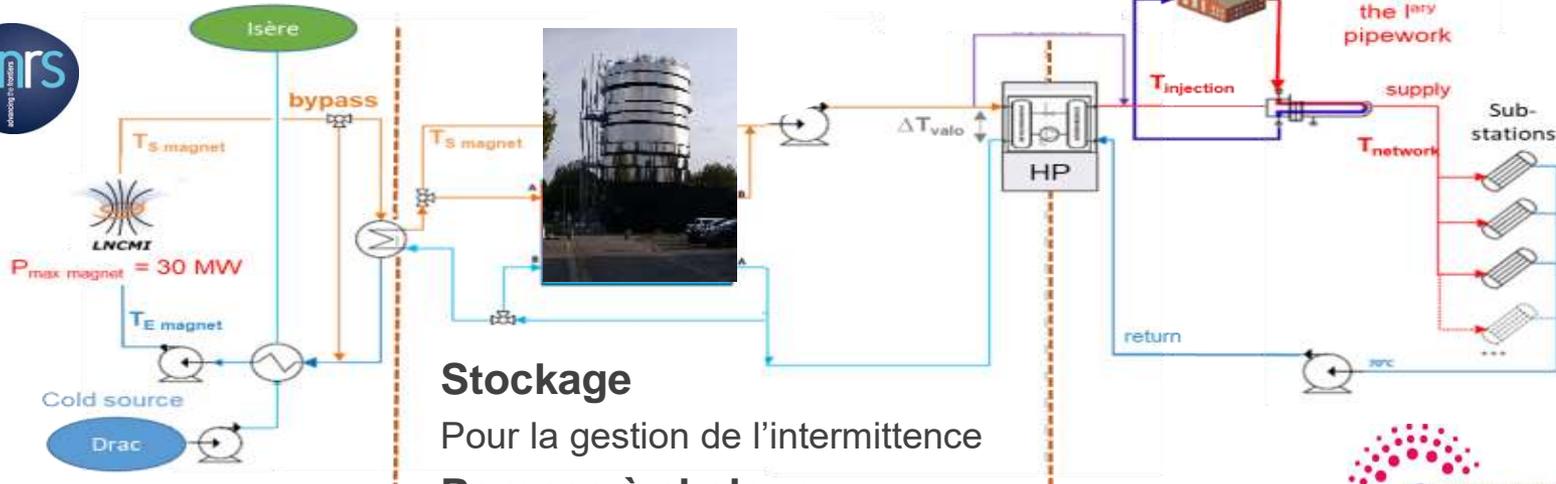
Schéma du système de récupération de la chaleur

Réseau de chaleur Grenoblois ~800 GWh/y
 dont presque **~20 GWh/an**



~15 GWh/an

~20 GWh/an



Stockage

Pour la gestion de l'intermittence

Pompes à chaleur

Pour l'adaptation en température



Pas d'aboutissement du projet sous cette forme :

Blocages techniques

dimensionnement du stockage lié à l'usage des chercheurs

Blocages institutionnels

institutions appelées à un pilotage d'un projet transverse sur l'énergie

→ Expression des priorités et

besoins des parties prenantes non suffisamment formalisés

→ Publication en préparation (Eco Sesa)

1ère phase : valorisation sur le site du CNRS seul

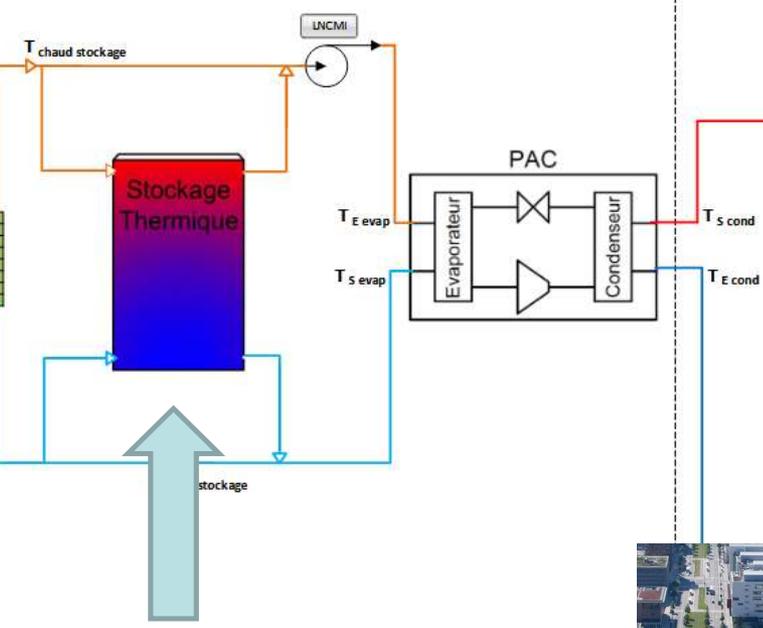
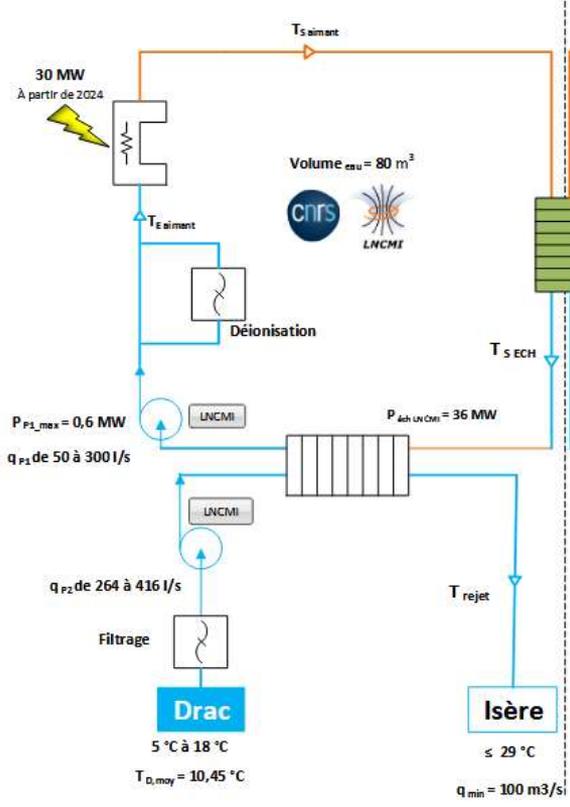
Thermo-hydraulique au LNCMI

Unité de valorisation

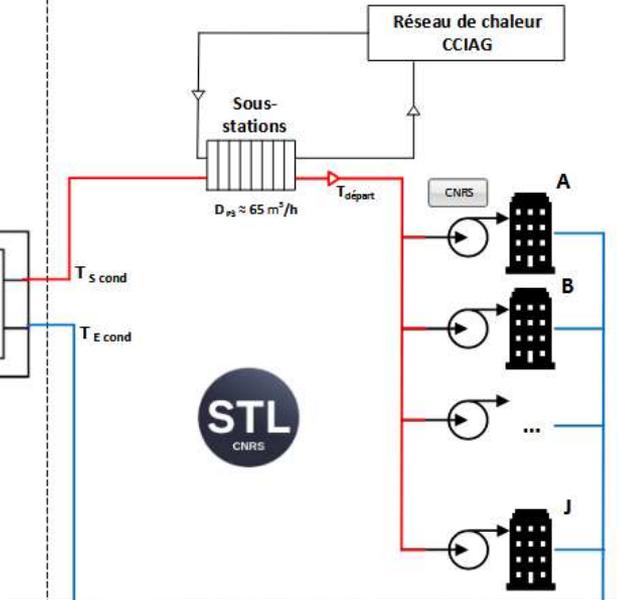
Système de chauffage de CNRS

~15 GWh/y

~2 GWh/y

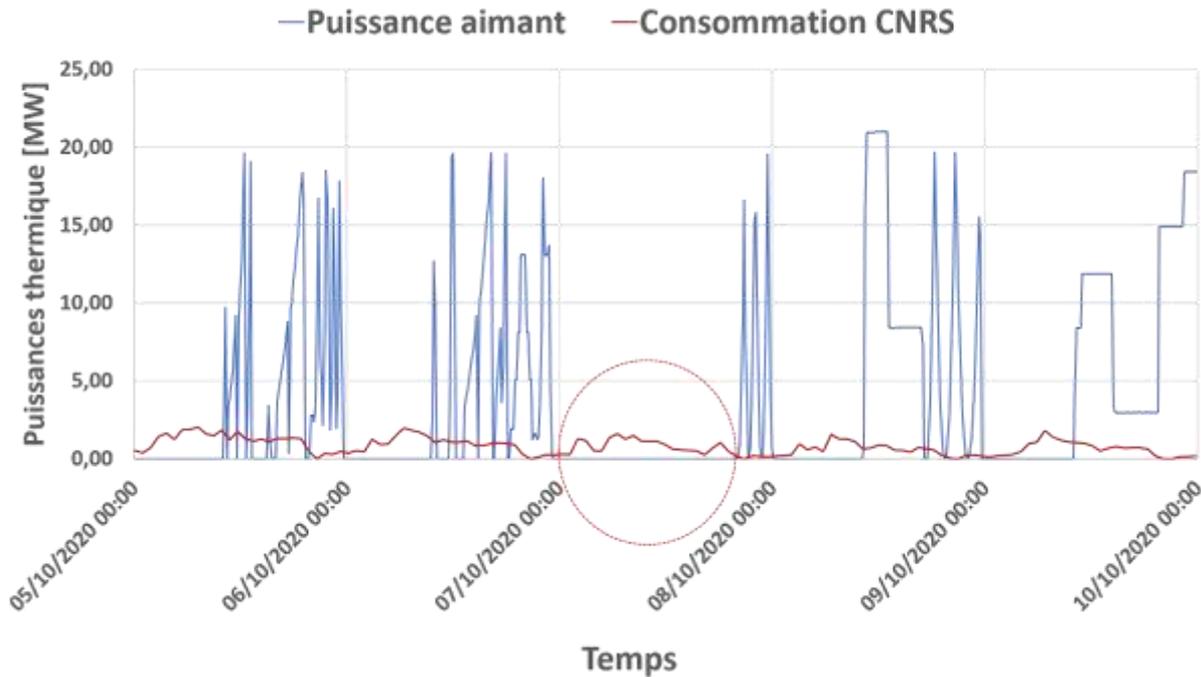


Phasage production/consommation ?



Verrou du projet de valorisation

Différences de temporalités et de puissances entre la source LNCMI, et la consommation du système de chauffage du CNRS

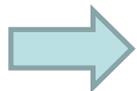


M. Zaarat :, Modélisation et dimensionnement du processus de valorisation de la chaleur fatale du LNCMI à l'aide du logiciel OMEGAAlpes, M2, 2022

Sollicitation du chercheurs



Politique de l'infrastructure de recherche

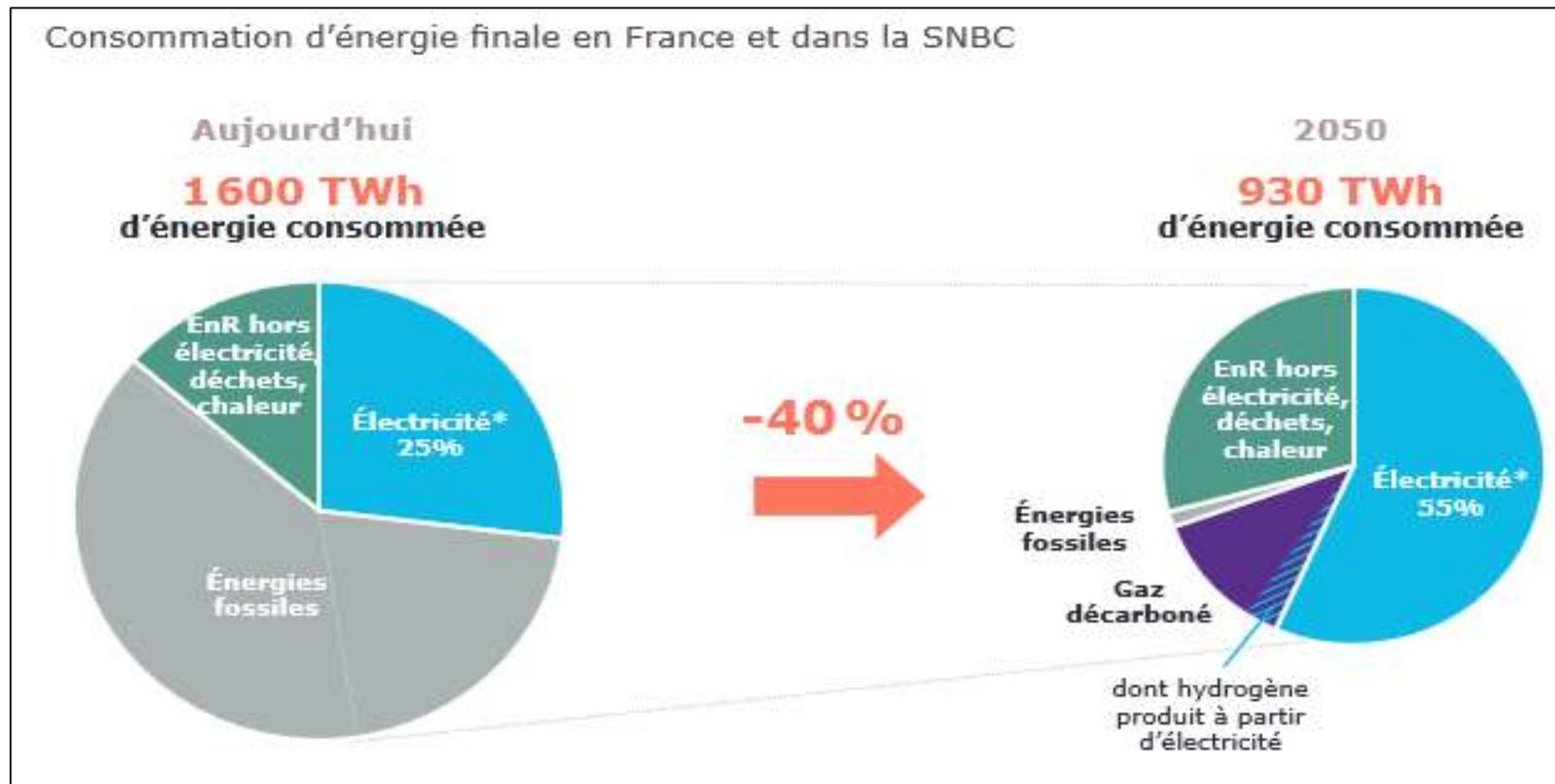


Solution : « apprendre en marchant », notion de « Living Lab »
Investissement à confirmer pour 2023-2024 pour l'installation du système

Contexte énergétique global

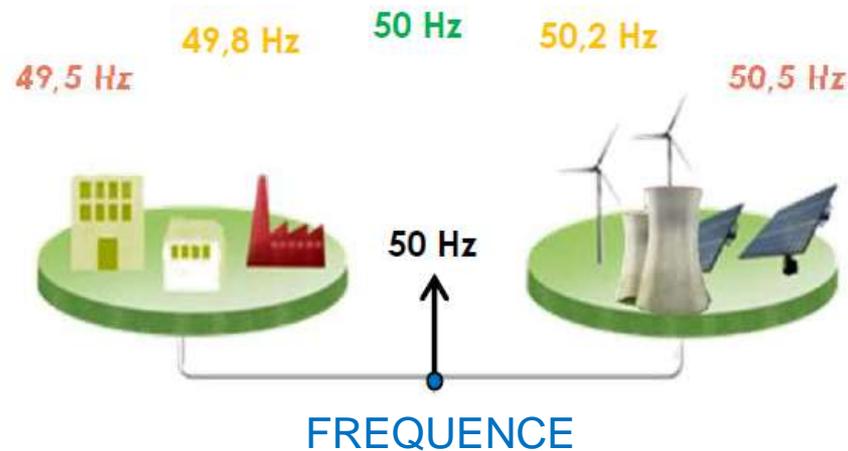
Engagement à la neutralité carbone en France en 2050 → 27 ans et 2 mois

→ Baisse de la consommation globale d'énergie et augmentation de la part de l'électricité



RÉSEAU ELECTRIQUE

Sur le réseau à chaque instant : Production = Consommation sur le réseau

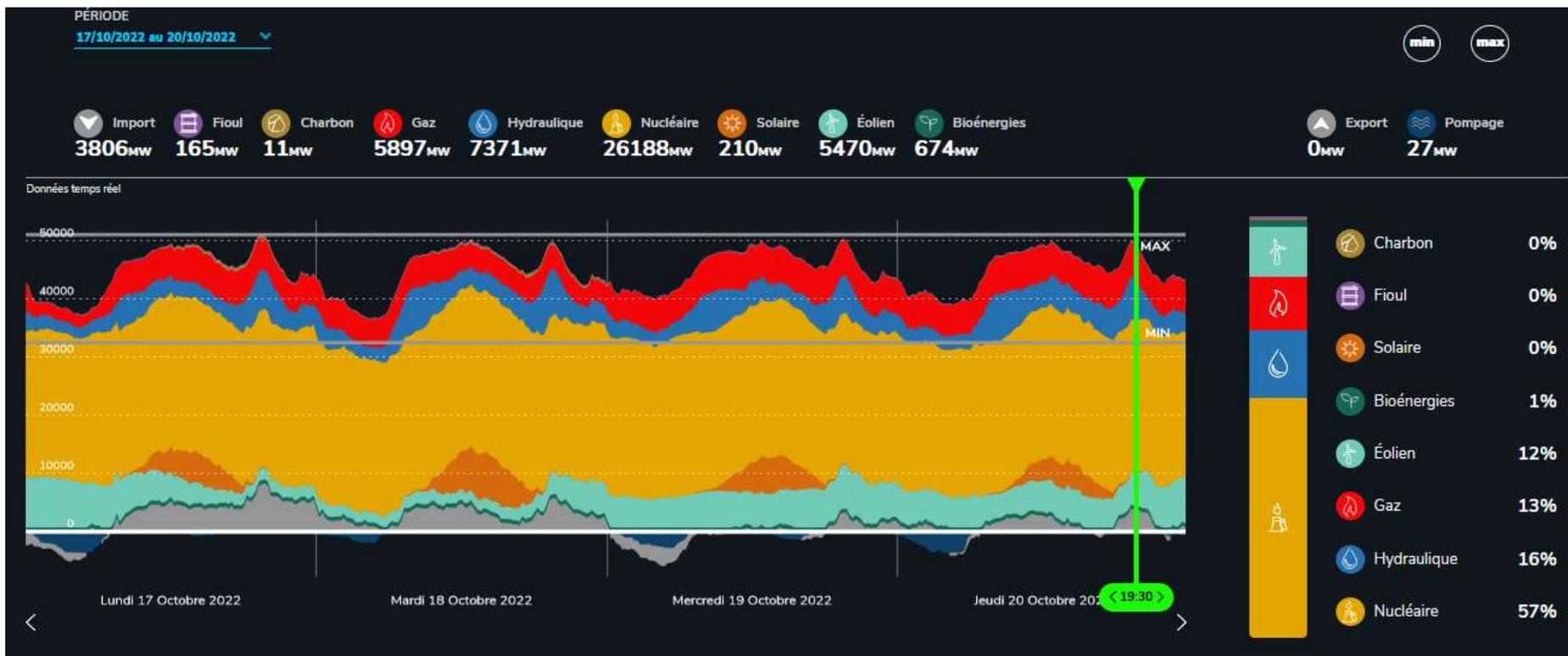


Source : RTE

Flexibilité: Possibilité de moduler (ou d'effacer) sa consommation pour contribuer à l'équilibre

▪ **Nouveaux acteurs sur le reseau :** les agrégateurs, opérateurs de flexibilité

Exemple de consommation d'électricité



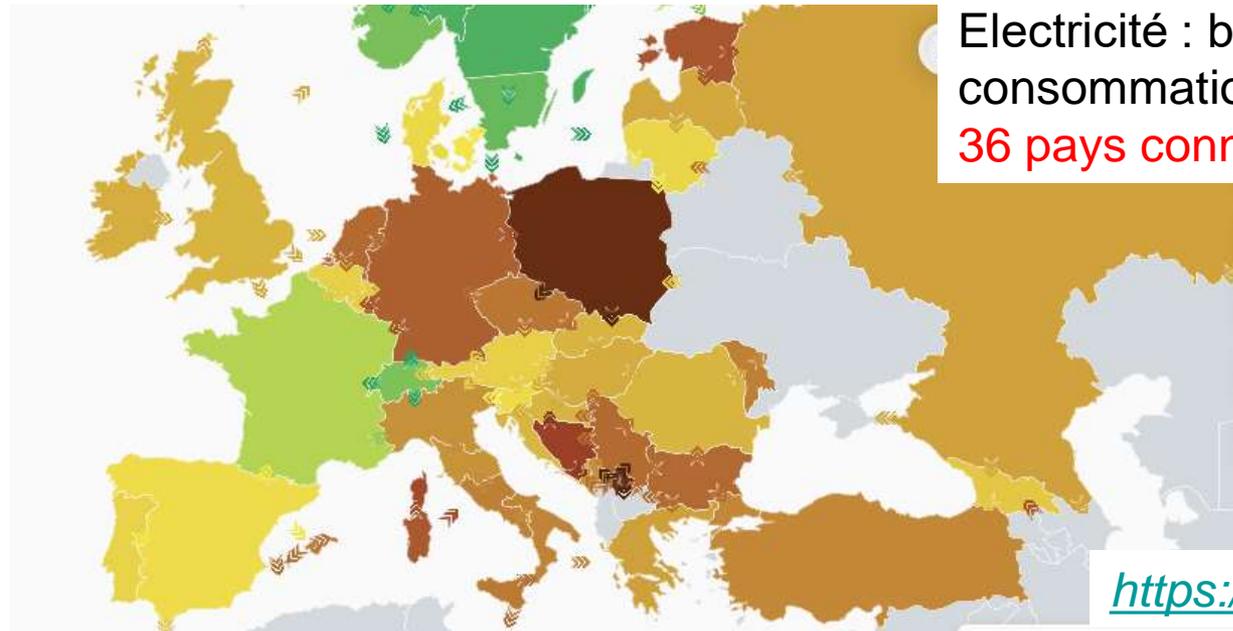
Source site *Ecomix RTE* :

<https://www.rte-france.com/eco2mix>

Pour une vision européenne instantanée:

<https://app.electricitymap.org/zone/FR>

SERVICES AU RÉSEAU ÉLECTRIQUE : LES INFRASTRUCTURES DE RECHERCHE PEUVENT CONTRIBUER ACTIVEMENT À LA STABILITÉ DU RESEAU



Electricité : besoins d'équilibre entre consommation et production
36 pays connectés en Europe

<https://app.electricitymaps.com>

<https://www.rte-france.com/eco2mix>

Flexibilité des infrastructures de recherche :

Possibilité de moduler (ou d'effacer) sa consommation pour contribuer à l'équilibre

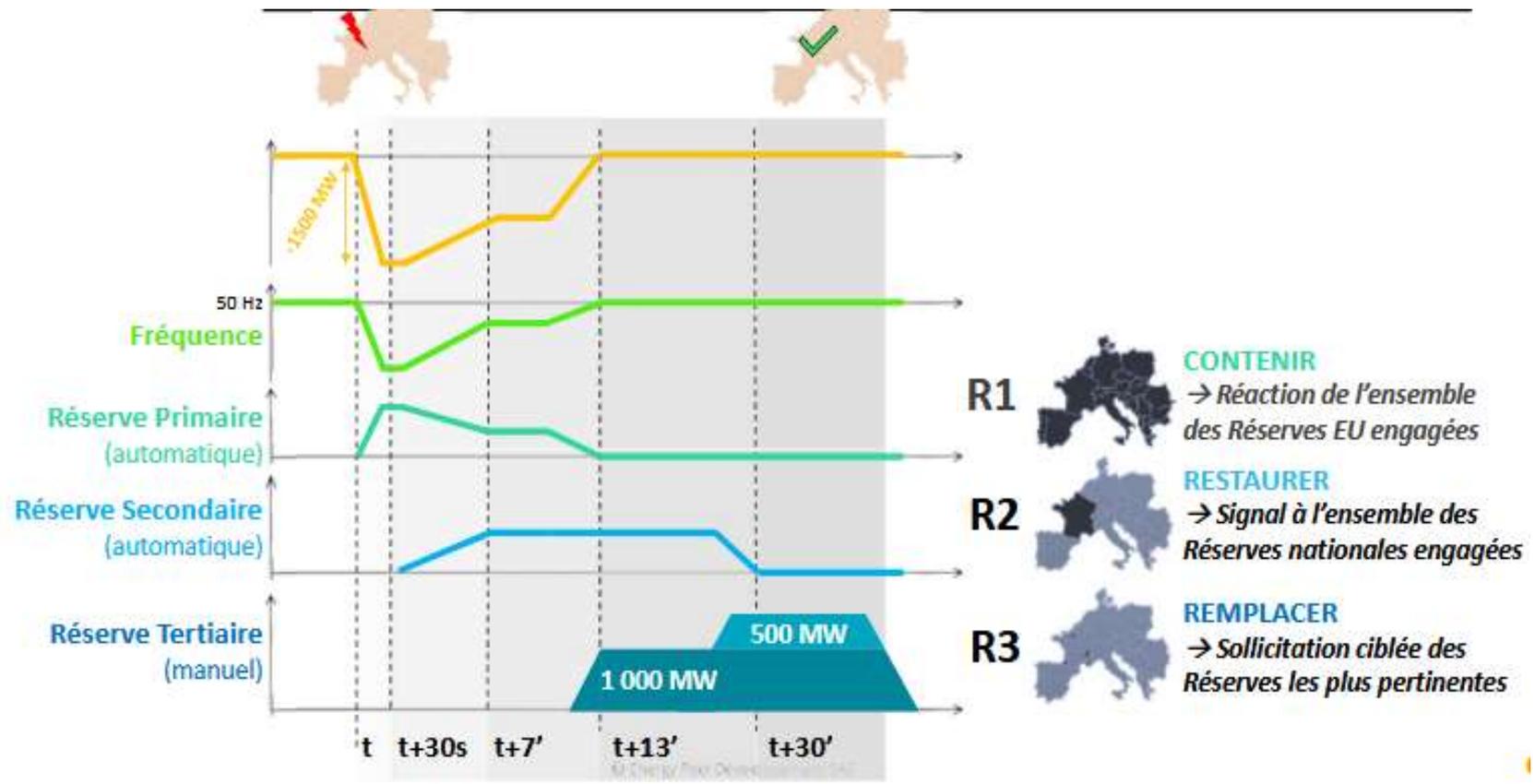
- pour une durée donnée
- à différentes échelles de temps (qui correspondent à la réserve primaire, secondaire et tertiaire)

→ Question critique pour la transition



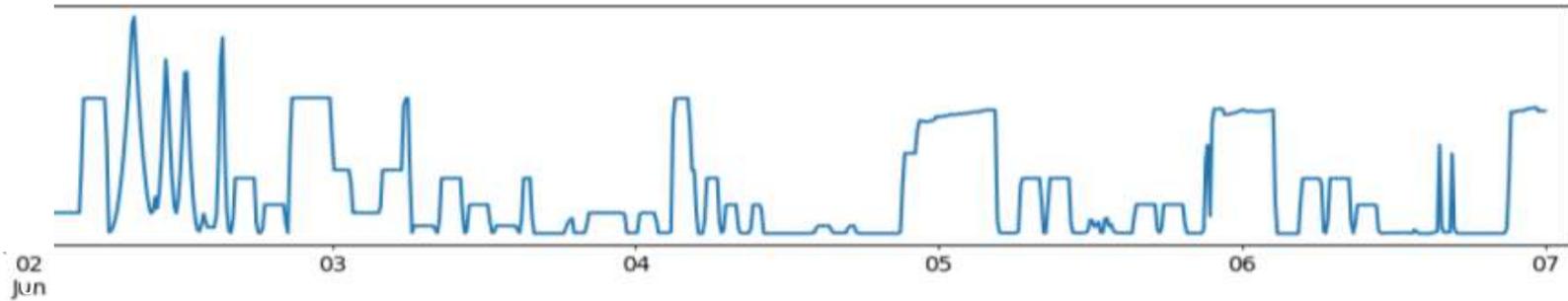
Temporalité du retour à l'équilibre

1. L'équilibrage du système



Iconographie Energy Pool

Optimiser les usages pour des services au réseau



Contraintes

➔ **Jusqu'à 2018** : caractéristiques du planning

- Organisation par semestre *Utilisateurs Pic vs Plateau*
- Jours interdits : ~10 jours par an
- Décembre à mars : seulement la nuit

Travail de nuit

➔ **A partir de 2020** : retour au fonctionnement de jour

Le LNCMI teste et met oeuvre des opérations d'effacements

- "NEBEF" → déplacement de bloc d'énergie
- "PP2" → capacité à s'engager à s'effacer sur demande

**Nécessité d'accroître
de la prédictibilité de
l'usage**

➔ **A partir de 2023** : certification du LNCMI
pour les réserves primaires et secondaires

**Automatisation du pilotage &
Acceptabilité de la
dégradation éventuelle du
service.**

CONCLUSIONS

Production de B intenses au LNCMI

1. Servir la science en optimisant les usages
2. Services au réseau (électricité)
3. Service au quartier (chaleur)



3 objectifs «intriqués» socialement et techniquement qui transforment :

- les modes de gouvernances,
- l'nfrastructure et les réseaux
- les modèles économiques



Supports pour développer l'approche interdisciplinaire des projets

Cellule Energie du CNRS

les services financiers et juridiques du CNRS

Projet interdisciplinaire Eco SESA et OTE

Projet Isabel (Europe)



European Magnetic Field Laboratory

Actuellement 15 à 25 jours de pointes par an sur :
janvier, février, mars, novembre et décembre (hors we et vacances de noel)

15 jours PP2&PP1 / an

avec la clef de répartition suivante

11 jours sur janvier, février et mars,
4 jours sur novembre et décembre (hors vacances de Noel)
dont 3 jours maximum sur mars et novembre

Jours de forte consommation pendant lesquels les fournisseurs mesurent les consommations de leurs clients, pour acheter des garanties de capacités électriques correspondantes sur le marché.

Le LNCMI a choisi de ne pas consommer ces jours de 7h à 15 H puis de 18 à 20 H

→ diminution de son prix d'achat de l'électricité

0 à 10 jours PP2 non PP1 / an

Répartition libre de nov à mars (hors vacances de Noel)

Jours de tension sur le réseau pendant lesquels RTE sollicite de l'effacement.

Le LNCMI se propose à l'effacement sur ces jours de tension du réseau électrique.

→ rémunération pour service rendu

→ Depuis 2 ans : une quinzaine d'effacements ont été effectués durant des périodes critiques pour la stabilité du réseau

$$B = 4\pi 10^{-7} n I \quad (\text{loi d'Ampère})$$

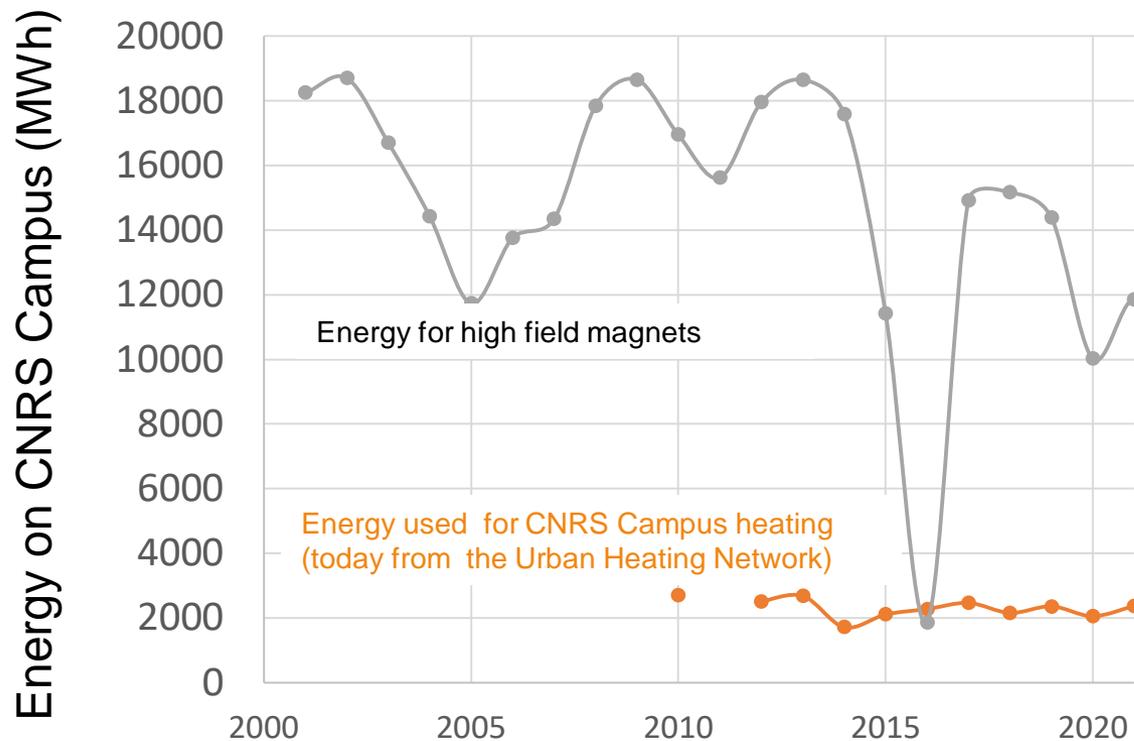
avec n : nombre de tours par unité de longueur
et I : intensité du courant

Pour 40 teslas dans un diamètre de 34 mm :

$\Rightarrow 4\,500\,000$ Ampère.Tours

\rightarrow Au LNCMI 30 000 ampères sur ~ 150 tours

Which solutions for a sustainable (resilient ?) energy management at high field facilities ?

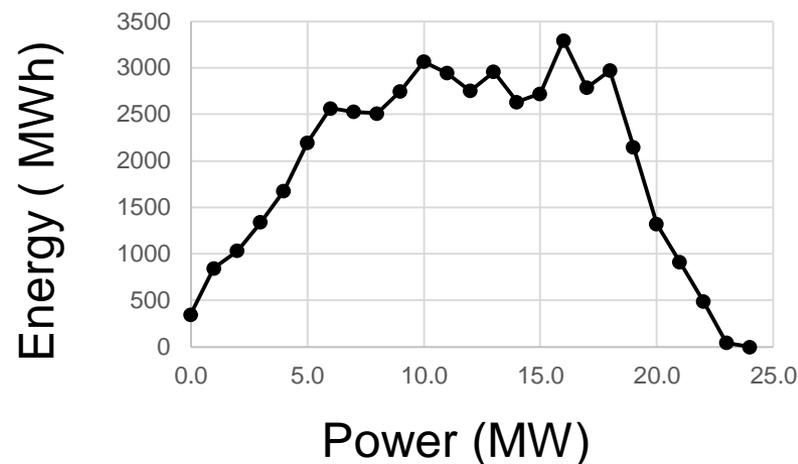
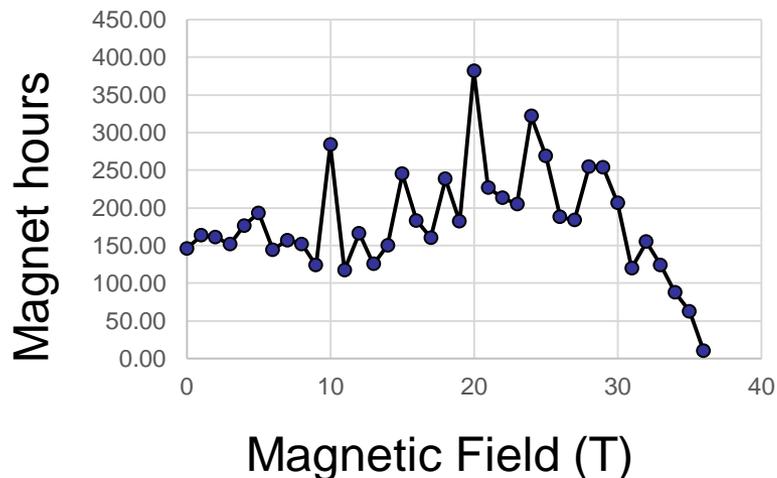


→ Use of HTc superconducting magnets for long duration experiments

→ Ancillary Services for the Electrical Network

→ Enhancement of resistive magnet efficiency & recovering the waste heat

Use of the two main high field magnet site at LNCMI-G Jan. 2018 to Sept. 2022



Tendencies

Use of very high field mainly for « sweeping » experiments due to **budget limitation**

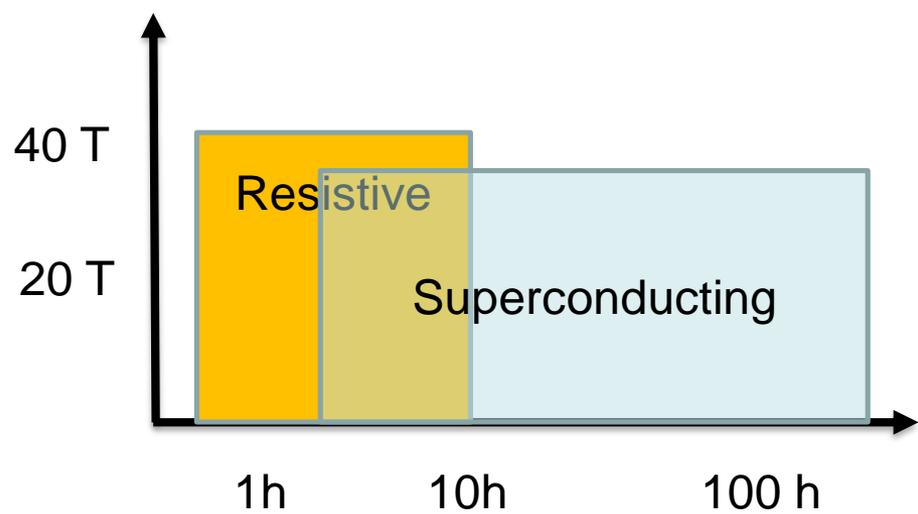
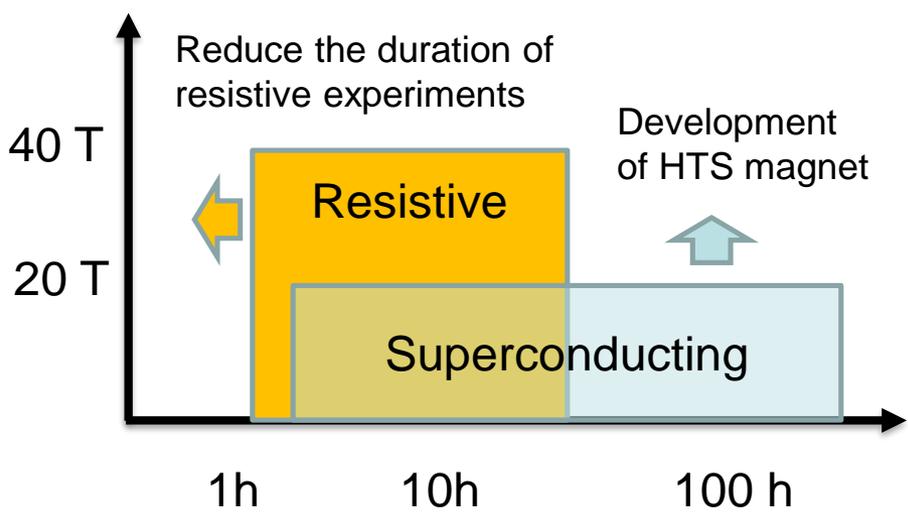
→ development of HTS magnets for long duration experiments

The main energy is not spent **at maximal power**

→ Consequence on the dimensionning of a heat valorization project



Developping HTS magnets for long duration high field experiments



National fundings

FASUM (CEA-CNRS) → investment for a 30 T & then 40 T all superconducting user magnet

H2020 supports

SUPER-EMFL

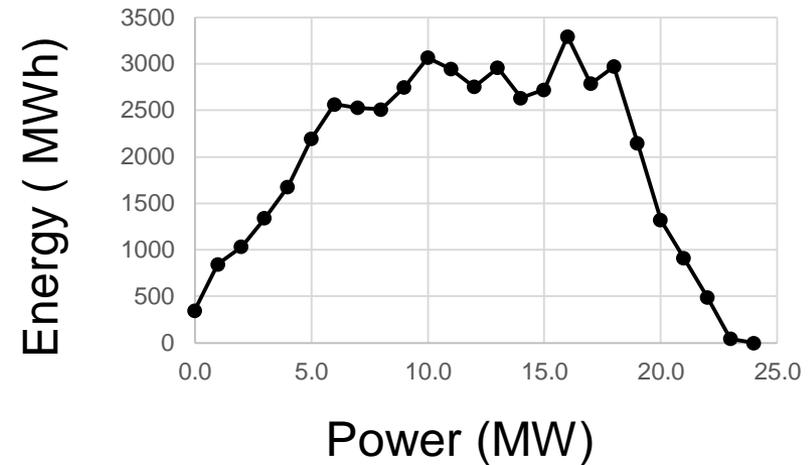
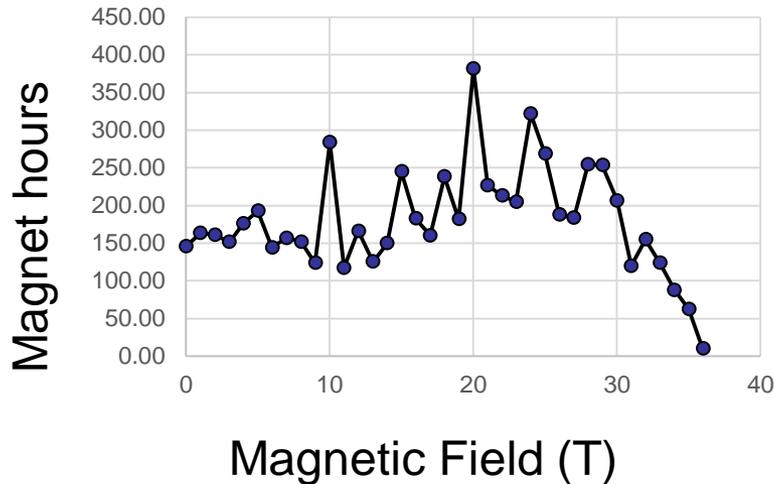
→ To disseminate the HTS technology through research infrastructure

ISABEL

→ To ensure the long term sustainability of high field laboratories

PROGRESS on this subject to be presented
by **Xavier CHAUD** at the coming 2022 ASC conference

Use of the two main high field site at LNCMI-G Jan. 2018 to Sept. 2022



Tendencies

use of very high field mainly for « sweeping » experiments
budget limitation

➔ development of HTS for long duration experiments

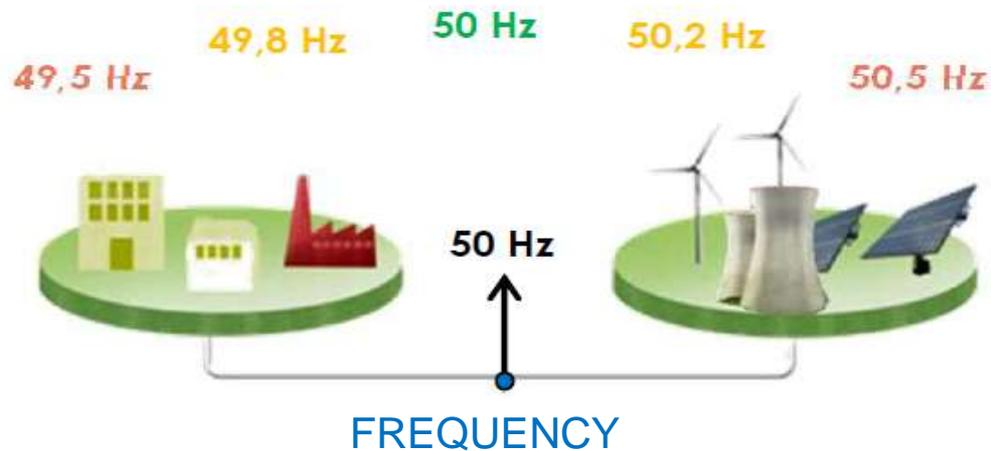
the main energy is not spent at maximal power

➔ Consequence on the dimensionning of a heat valorization project



SERVICES AU RESEAU ÉLECTRIQUE

EQUILIBRE PRODUCTION / CONSOMMATION
nécessaire à chaque instant sur le réseau



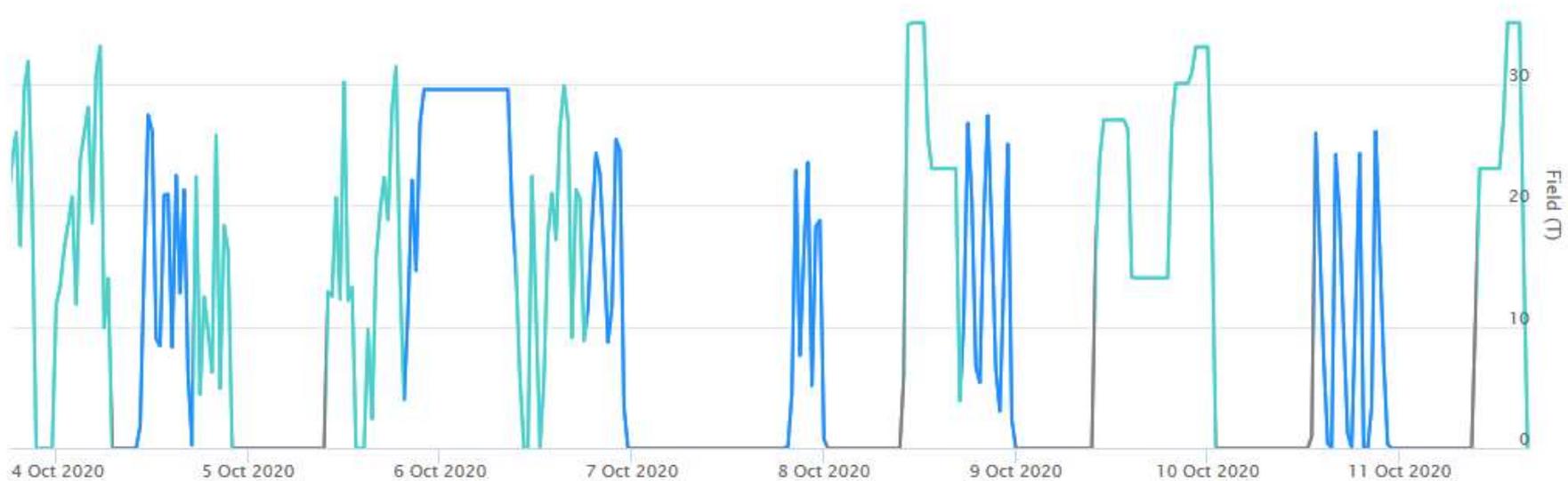
Source : RTE

Flexibilité: possibilité de s'effacer (ou de se connecter) sur le réseau pour une période donnée afin de contribuer à l'équilibre global du réseau

Contexte : transition des moyens de productions de l'électricité

→ Emergence d'un nouvel acteur : l'agrégateur

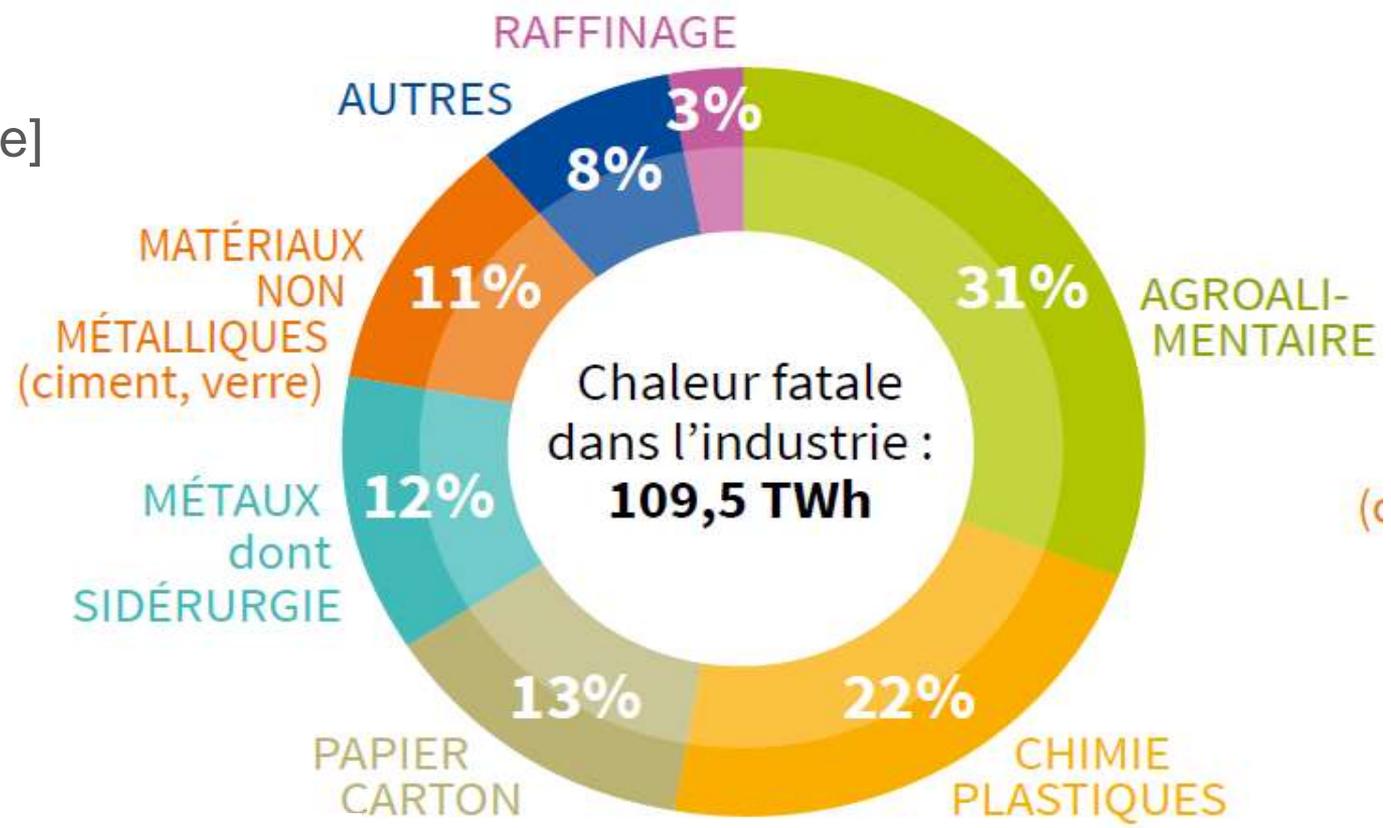
Consommation électrique au LNCMI : une image directe du travail de l'utilisateur



- Utilisation caractérisée par de fortes intermittences → prédiction difficile
- L'utilisateur-chercheur au cœur du process et acteur de **son évolution**
 - nécessité d'une démarche inclusive,
 - introduction d'une dimension sociale

La chaleur fatale en France

Source [Ademe]



Dont 15% à proximité d'un réseau de chaleur

Two cooling loops for the high field laboratory LNCMI-Grenoble

$T_{\text{out magnet}}$
30° to 45°C

$T_{\text{in magnet}}$
10° to 25°C



T_{out}
up to 29°C
Before dilution



T_{in}
4° to 18° C



Recovering the waste heat : initial scheme

High magnetic field facility

~15 GWh/y

Grenoble global heating network ~800 GWh/y

District network

~ 25 GWh/y

► Magnets

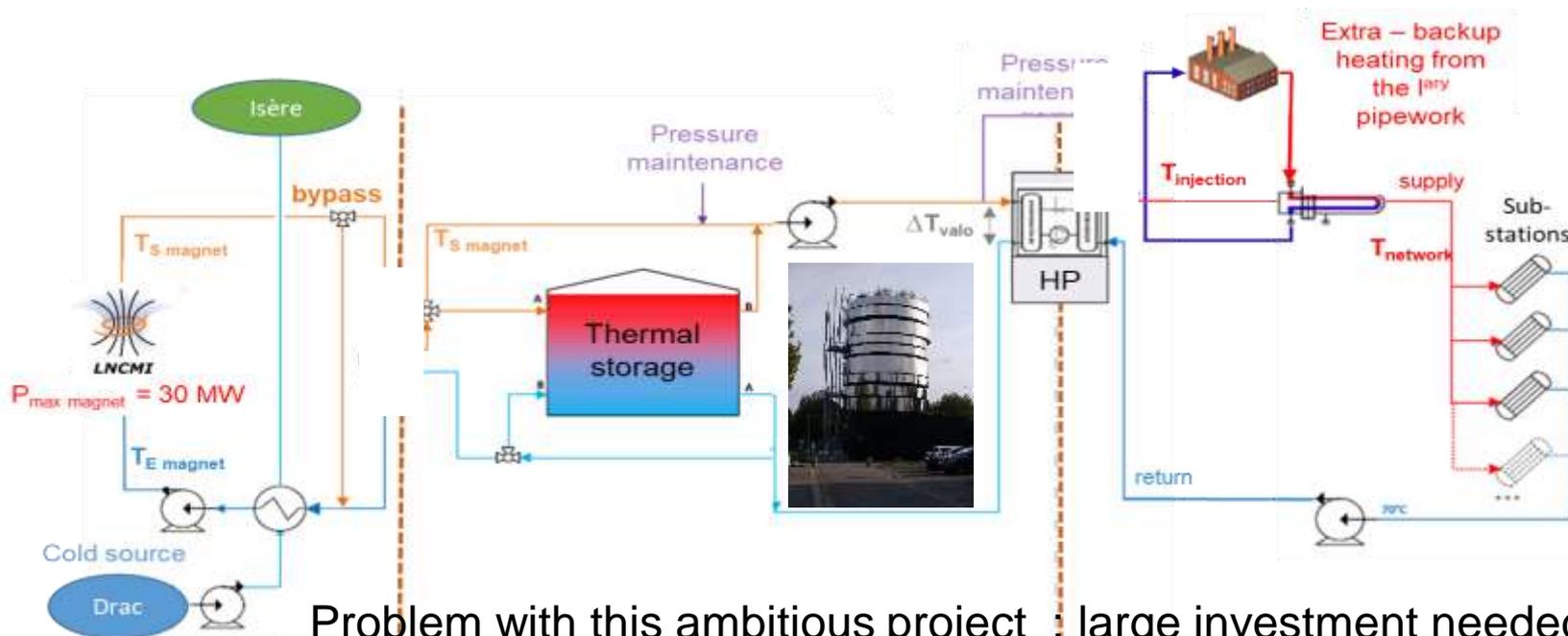
- Magnet outlet Temp.
- Planning, electricity tariffs

► Storage

- Size and capacity, ΔT
- Operation strategy

► Heat Pump

- Power level
- Balance between COP & ΔT



Problem with this ambitious project : large investment needed
 → Decide to Start with a local project

1st step for recovering the waste heat : a local loop on CNRS Campus



Perimeter : the heating loop of the CNRS buildings



Needs : 2 GWh per year (provided by the urban heating network)

Objective 10 to 30 % covered by the high field lab. without heat pump nor storage

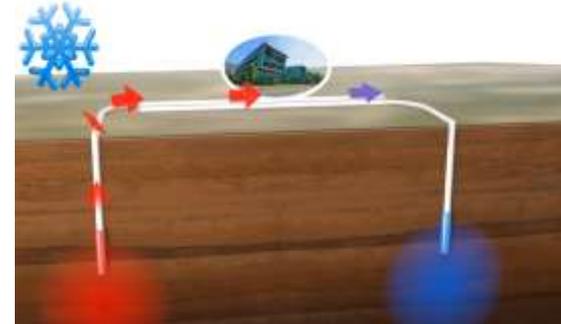
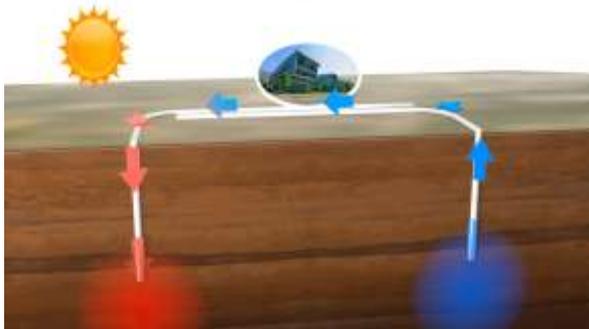
2023 : final studies

2024 : operation

2025 : 2nd step with a direct connection to the urban heating network (tbc)

Other solution implemented in high field labs: the Nijmegen Aquifer Thermal Energy Storage

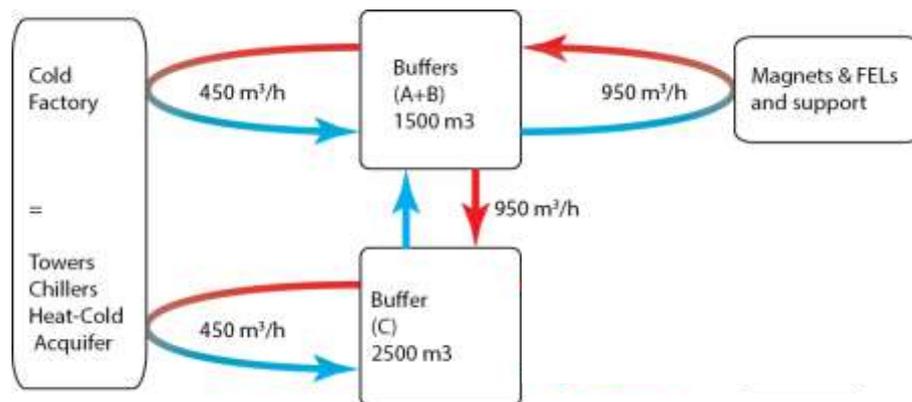
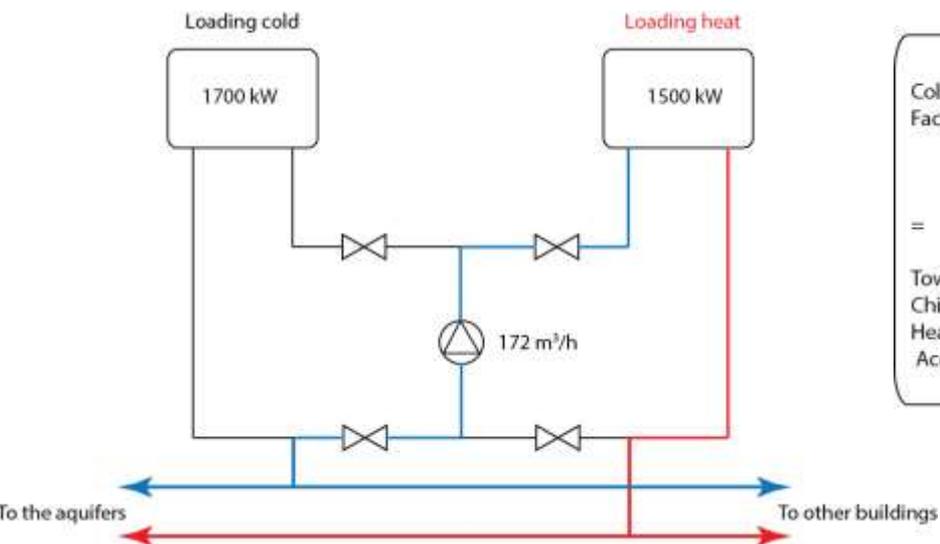
- Aquifers to store cold and warm water
- Heat pumps in building to cool or heat building



10 wells,
5 for cold storage,
5 for heat storage

Since 2014 : the high field lab is connected to this network.

ATES & High Field Magnet Laboratory in Nijmegen

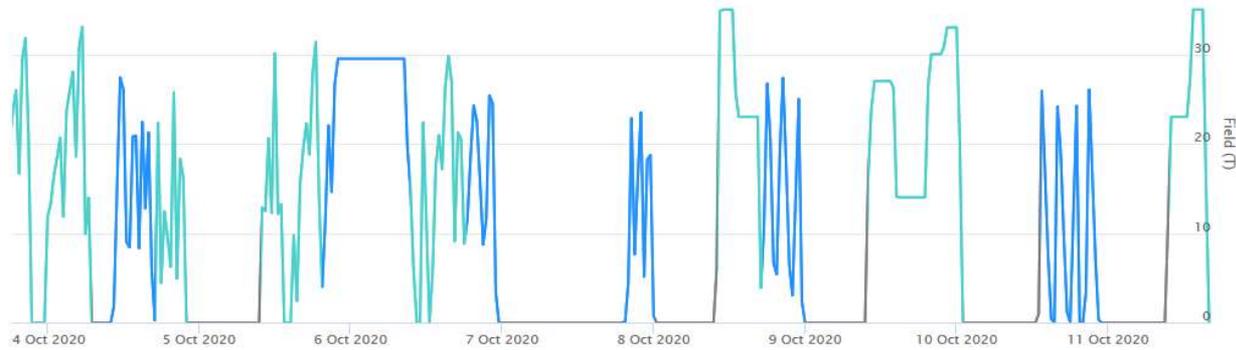


Heat is stored in 1500 + 2500 m³ buffer

➔ Re-use ~15% of the 10 GWh annual energy consumption



SERVICE TO THE GRID AT LNCMI



➔ **From December 2020** : LNCMI has participated to the balance of the electrical grid through :

- “NEBEF”, load shedding mechanisms ➔ capacity to shift an energy block
- “PP2”, capacity mechanism (during winter peaks) ➔ capacity to withdraw from the grid

These mechanisms were made operational thanks to **a 2 day ahead planification.**
A total of 15 operations were organised within an experimental programme with an aggregator

➔ **Next step** : faisability studies of piloted consumption for **frequency regulation**
 (1st & 2nd reserve mechanisms, see Energy Pool presentation)
 Could be an interesting collaboration with Synchrotron facilities

➔ **Objective to increase the number of operations**

CONCLUSIONS

Energy management in high field facilities

- Optimise the usage
- Services to the Grid
- Services to the District (heat valorisation)



3 intricated themes with the User at the center of the process



What do we need to go further (and faster) ?

- ➔ Easier access to energy data for efficient studies
(*OTE project in Grenoble*),
- ➔ Transverse gouvernances on Energy issues,
- ➔ Publish to learn from each other
.. but not only the sucess stories.

We thanks supports from :

« Cellule Energie » CNRS



Isabel Project (Europa H2020)



➔ *About the interdisciplinary approach to advance on these 3 items see presentation of **Frédéric Wurtz** in this session.*

Interdisciplinary Project IDEX, UGA



High field Magnets are not commercial products → Facilities are required for researchers

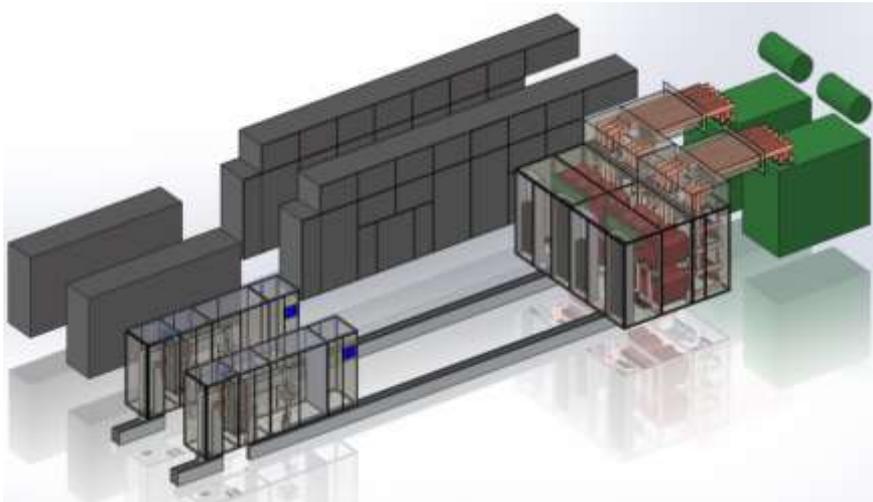


DC Field in Grenoble

24 MW to power the high field resistive magnets.

Pulsed field in Toulouse

Various **capacitors** banks (10 kJ to 14 MJ)

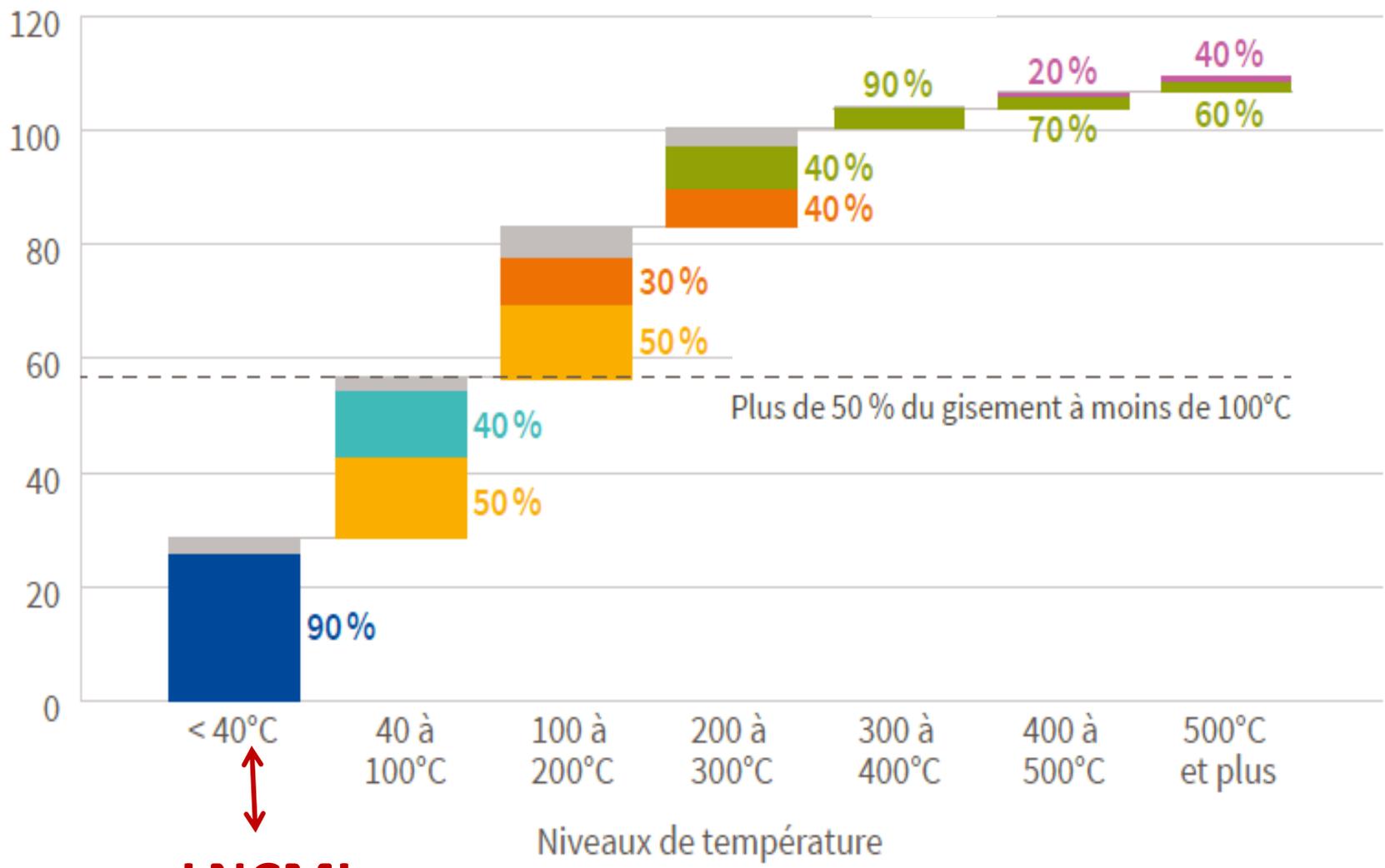


4 of them are mobile

to perform experiments in other facilities and combine magnetic field with intense lasers, X-rays, or neutrons (LULI, ESRF, SLS, ILL...)

Chaleur fatale en France (TWh)

Gisement en TWh



LNCMI

Energy for high field resistive magnets

Pulsed B (~100T)



The Maximal pulse duration (~100 ms) is given by

$$\Delta t \propto [AI] = \int_{77K}^{T_{final}} \frac{C_v}{\rho} dT$$

20 MJ max. per pulse

→ 15 MWh per year

Continuous (~ 40 T)



Need of a permanent turbulent forced flow cooling :

$$h(W.m^{-2}.K^{-1}) \propto V^{0,8} D_H^{-0,2}$$

24 MW max of Power

→ 15 GWh per year