

NEEDS 2014-2015

# L(ow) M(ach) N(uclear) C(ore) MODELS

CONSTRUCTION, ÉTUDE ET DISCRÉTISATION 1D/2D/3D DE MODÈLES  
ASYMPTOTIQUES BAS MACH DÉDIÉS À LA THERMOHYDRAULIQUE

Gloria FACCANONI<sup>1</sup>

Stéphane DELLACHERIE<sup>2</sup> Bérénice GREC<sup>3</sup> Yohan PENEL<sup>4</sup>

<sup>1</sup>IMATH – Université de Toulon

<sup>2</sup>DEN/DANS/DM2S/STMF – CEA Saclay & École Polytechnique de Montréal

<sup>3</sup>MAP5 – Université Paris Descartes

<sup>4</sup>Équipe ANGE (CEREMA-UPMC-CNRS-INRIA)

# OUTLINE

- 1 Contexte générale de l'étude
- 2 État de l'art avant le projet NEEDS
- 3 Résultats obtenus grâce au soutien NEEDS 2014-2015 et perspectives
  - AXE ①. Thermodynamique et équations d'état
  - AXE ②. Enrichissement de la modélisation
  - AXE ③. Analyse et schémas numériques
- 4 Manifestations scientifiques soutenues par NEEDS 2014-2015
- 5 Collaborations futures

# OUTLINE

- 1 Contexte générale de l'étude
- 2 État de l'art avant le projet NEEDS
- 3 Résultats obtenus grâce au soutien NEEDS 2014-2015 et perspectives
- 4 Manifestations scientifiques soutenues par NEEDS 2014-2015
- 5 Collaborations futures

## CADRE

**Modélisation et simulation numérique** des transferts de chaleur dans un cœur (ou un générateur de vapeur) de réacteurs nucléaires à caloporteur eau (ou sodium ou sel fondu), lorsque le régime de convection est à **bas nombre de Mach**, avec ou sans changement de phase.



## APPROCHE CLASSIQUE

Les codes industriels de thermohydraulique système (e.g. Cathare, Flica4 et Relap) utilisent des **modèles compressibles** de type Navier-Stokes dans lesquelles les **ondes acoustiques** sont prises en compte.

- en théorie, ils sont adaptés à **tout nombre de Mach**
- en pratique, la prise en compte de l'acoustique à bas nombre de Mach dans un code compressible a un **coût important** en terme de **temps CPU**, de **robustesse** et/ou de **précision** selon le schéma compressible utilisé

Dans de nombreuses situations, le nombre de Mach est faible

## APPROCHE CLASSIQUE

Les codes industriels de thermohydraulique système (e.g. Cathare, Flica4 et Relap) utilisent des **modèles compressibles** de type Navier-Stokes dans lesquelles les **ondes acoustiques** sont prises en compte.

- en théorie, ils sont adaptés à **tout nombre de Mach**
- en pratique, la prise en compte de l'acoustique à bas nombre de Mach dans un code compressible a un **coût important** en terme de **temps CPU**, de **robustesse** et/ou de **précision** selon le schéma compressible utilisé

Dans de nombreuses situations, le nombre de Mach est faible

## APPROCHE CLASSIQUE

Les codes industriels de thermohydraulique système (e.g. Cathare, Flica4 et Relap) utilisent des **modèles compressibles** de type Navier-Stokes dans lesquelles les **ondes acoustiques** sont prises en compte.

- en théorie, ils sont adaptés à **tout nombre de Mach**
- en pratique, la prise en compte de l'acoustique à bas nombre de Mach dans un code compressible a un **coût important** en terme de **temps CPU**, de **robustesse** et/ou de **précision** selon le schéma compressible utilisé

Dans de nombreuses situations, le nombre de Mach est faible

## APPROCHE CLASSIQUE

Les codes industriels de thermohydraulique système (e.g. Cathare, Flica4 et Relap) utilisent des **modèles compressibles** de type Navier-Stokes dans lesquelles les **ondes acoustiques** sont prises en compte.

- en théorie, ils sont adaptés à **tout nombre de Mach**
- en pratique, la prise en compte de l'acoustique à bas nombre de Mach dans un code compressible a un **coût important** en terme de **temps CPU**, de **robustesse** et/ou de **précision** selon le schéma compressible utilisé

Dans de nombreuses situations, le nombre de Mach est faible



# APPROCHE BAS MACH

Si l'écoulement est à bas nombre de Mach, l'acoustique peut être négligée.

Lorsque l'écoulement est en régime bas Mach, on se propose de

- **construire des modèles** via des développements asymptotiques bas Mach appliqués à des modèles compressibles de type Navier-Stokes,
- **étudier** les modèles ainsi proposés
  - **mathématiquement** (solutions analytiques, propriétés de positivité, etc.)
  - **numériquement** (construction de schémas préservant ces propriétés)

# INTÉRÊTS DE L'APPROCHE BAS MACH

**Approche complémentaire** des études traditionnelles réalisées avec des codes industriels de thermohydraulique basés sur des **modélisations compressibles**.

- Nouvelles informations (théoriques et numériques) utiles pour comprendre la thermohydraulique en régime bas Mach
- Aide à la validation des codes industriels compressibles dans le régime bas Mach

# INTÉRÊTS DE L'APPROCHE BAS MACH

**Approche complémentaire** des études traditionnelles réalisées avec des codes industriels de thermohydraulique basés sur des **modélisations compressibles**.

- ➊ Nouvelles informations (théoriques et numériques) utiles pour comprendre la thermohydraulique en régime bas Mach
- ➋ Aide à la validation des codes industriels compressibles dans le régime bas Mach

# INTÉRÊTS DE L'APPROCHE BAS MACH

**Approche complémentaire** des études traditionnelles réalisées avec des codes industriels de thermohydraulique basés sur des **modélisations compressibles**.

- 1 Nouvelles informations (théoriques et numériques) utiles pour comprendre la thermohydraulique en régime bas Mach
- 2 Aide à la validation des codes industriels compressibles dans le régime bas Mach

# OUTLINE

- 1 Contexte générale de l'étude
- 2 État de l'art avant le projet NEEDS
- 3 Résultats obtenus grâce au soutien NEEDS 2014-2015 et perspectives
- 4 Manifestations scientifiques soutenues par NEEDS 2014-2015
- 5 Collaborations futures

# MODÈLE LMNC — ①

- L'approche bas Mach a d'abord été appliquée au cas **monophasique**, le modèle bas Mach proposé étant nommé

Low Mach Nuclear Core (LMNC) model

Deux pressions :

- dynamique  $\bar{p}$
- thermodynamique  $p_0$  **constante**

⇒ S. DELLACHERIE. *On a low Mach nuclear core model*. *ESAIM Proc.*, 2012. Article issu du congrès SMAI-2011

- Des solutions analytiques instationnaires 1D en gaz raidi de ce modèle ont été explicitées.

⇒ M. BERNARD, S. DELLACHERIE, G. FACCANONI, B. GREC, O. LAFITTE, T.-T. NGUYEN and Y. PENEL. *Study of a low Mach nuclear core model for single-phase flow*. *ESAIM Proc.*, 2012. Article issu du projet BASMAC au CEMRACS-2011.

# MODÈLE LMNC — ①

- L'approche bas Mach a d'abord été appliquée au cas **monophasique**, le modèle bas Mach proposé étant nommé

Low Mach Nuclear Core (LMNC) model

Deux pressions :

- dynamique  $\bar{p}$
- thermodynamique  $p_0$  **constante**

⇒ S. DELLACHERIE. *On a low Mach nuclear core model. ESAIM Proc.*, 2012. Article issu du congrès SMAI-2011

- Des **solutions analytiques instationnaires 1D en gaz raidi** de ce modèle ont été explicitées.

⇒ M. BERNARD, S. DELLACHERIE, G. FACCANONI, B. GREC, O. LAFITTE, T.-T. NGUYEN and Y. PENEL. *Study of a low Mach nuclear core model for single-phase flow. ESAIM Proc.*, 2012. Article issu du projet BASMAC au CEMRACS-2011.

## MODÈLE LMNC — ②

- Le modèle LMNC a été enrichi avec un modèle de **changement de phase** avec des lois de type gaz raidi pour chaque phase pure.
  - Des **solutions analytiques 1D** instationnaires et stationnaires ont été établies avec ou sans changement de phase.
  - Des **schémas numériques 1D explicites, inconditionnellement stables et précis** basés sur une **méthode des caractéristiques** ont été proposés et validés à l'aide des solutions analytiques.

⇒ M. BERNARD, S. DELLACHERIE, G. FACCANONI, B. GREC and Y. PENEL. *Study of a low Mach nuclear core model for two-phase flows with phase transition I : stiffened gas law*. ESAIM : Mathematical Modelling and Numerical Analysis, 2014

- Nous avons proposé une **approche numérique 2D** qui résout le modèle bas Mach LMNC (sans changement de phase et en gaz raidi) avec une **méthode d'éléments finis couplée à une méthode des caractéristiques**.

⇒ S. DELLACHERIE, G. FACCANONI, B. GREC, E. NAYIR and Y. PENEL. *2D numerical simulation of a low Mach nuclear core model with stiffened gas using FreeFem++*. ESAIM : Proceedings, 2014. Article issu du minisymposium NUMACH au congrès SMAI-2013.



# OUTLINE

- 1 Contexte générale de l'étude
- 2 État de l'art avant le projet NEEDS
- 3 Résultats obtenus grâce au soutien NEEDS 2014-2015 et perspectives**
- 4 Manifestations scientifiques soutenues par NEEDS 2014-2015
- 5 Collaborations futures

## Objectif général du projet NEEDS

Enrichir la modélisation et la discrétisation du modèle LMNC

Le projet s'est articulé autour de 3 axes :

- ① Thermodynamique et équations d'état (EOS)
- ② Enrichissement de la modélisation (EDP)
- ③ Construction et analyse de schémas numériques 1D/2D/3D

# OUTLINE

- 1 Contexte générale de l'étude
- 2 État de l'art avant le projet NEEDS
- 3 Résultats obtenus grâce au soutien NEEDS 2014-2015 et perspectives**
  - AXE ①. Thermodynamique et équations d'état
  - AXE ②. Enrichissement de la modélisation
  - AXE ③. Analyse et schémas numériques
- 4 Manifestations scientifiques soutenues par NEEDS 2014-2015
- 5 Collaborations futures

## AXE ①. CONSTAT

---

EOS de type **gaz raidi** pour chaque phase pure (liquide et vapeur) du fluide caloporteur

- ☹ Indépendamment des EOS des phases pures, le **mélange liquide-vapeur à saturation** peut toujours être considéré comme étant un fluide **monophasique de type gaz raidi** lorsque la pression thermodynamique est constante
- ☹ Construction de **solutions analytiques 1D** en transitoire avec ou sans changement de phase
- ☹ Il n'est pas possible d'obtenir une description précise des courbes de saturation lorsque l'on se rapproche des **pressions et températures de fonctionnement d'un REP**.

## AXE ①. CONSTAT

EOS de type **gaz raidi** pour chaque phase pure (liquide et vapeur) du fluide caloporteur

- ☺ Indépendamment des EOS des phases pures, le **mélange liquide-vapeur à saturation** peut toujours être considéré comme étant un fluide **monophasique de type gaz raidi** lorsque la pression thermodynamique est constante
- ☹ Construction de **solutions analytiques 1D** en transitoire avec ou sans changement de phase
- ☹ Il n'est pas possible d'obtenir une description précise des courbes de saturation lorsque l'on se rapproche des **pressions et températures de fonctionnement d'un REP**.

## AXE ①. CONSTAT

EOS de type **gaz raidi** pour chaque phase pure (liquide et vapeur) du fluide caloporteur

- ☺ Indépendamment des EOS des phases pures, le **mélange liquide-vapeur à saturation** peut toujours être considéré comme étant un fluide **monophasique de type gaz raidi** lorsque la pression thermodynamique est constante
- ☺ Construction de **solutions analytiques** 1D en transitoire avec ou sans changement de phase
- ☹ Il n'est pas possible d'obtenir une description précise des courbes de saturation lorsque l'on se rapproche des **pressions et températures de fonctionnement d'un REP**.

## AXE ①. CONSTAT

EOS de type **gaz raidi** pour chaque phase pure (liquide et vapeur) du fluide caloporteur

- ☺ Indépendamment des EOS des phases pures, le **mélange liquide-vapeur à saturation** peut toujours être considéré comme étant un fluide **monophasique de type gaz raidi** lorsque la pression thermodynamique est constante
- ☺ Construction de **solutions analytiques** 1D en transitoire avec ou sans changement de phase
- ☹ Il n'est pas possible d'obtenir une description précise des courbes de saturation lorsque l'on se rapproche des **pressions et températures de fonctionnement d'un REP**.

# AXE ①. RÉSULTATS

## Utilisation directe des tables thermodynamiques de l'eau en s'appuyant sur les données NIST.

La pression thermodynamique dans le modèle LMNC étant constante,

- on construit via des régressions polynomiales des EOS basées sur les tables **une fois pour toutes avant le début du calcul du transitoire** ;
- le calcul des EOS est simplifié car **toute fonction thermodynamique ne dépend que de l'enthalpie**<sup>1</sup>.

☞ S. DELLACHERIE, G. FACCANONI, B. GREC and Y. PENEL. *Study of a low Mach nuclear core model for two-phase flows with phase transition II : tabulated equation of state*. Soumis à Computers & Fluids.

---

<sup>1</sup>. Ce n'est pas du tout le cas pour les modèles compressibles pour lesquels la pression thermodynamique n'est pas constante : dans ce cas, l'appel aux équations d'état tabulées consiste à *fitter* une surface dépendant de l'enthalpie interne ET de la pression thermodynamique



## AXE ①. RÉSULTATS

Utilisation directe des tables thermodynamiques de l'eau en s'appuyant sur les données NIST.

La pression thermodynamique dans le modèle LMNC étant constante,

- on construit via des régressions polynomiales des EOS basées sur les tables **une fois pour toutes avant le début du calcul du transitoire** ;
- le calcul des EOS est simplifié car **toute fonction thermodynamique ne dépend que de l'enthalpie**<sup>1</sup>.

✉ S. DELLACHERIE, G. FACCANONI, B. GREC and Y. PENEL. *Study of a low Mach nuclear core model for two-phase flows with phase transition II : tabulated equation of state*. Soumis à Computers & Fluids.

---

1. Ce n'est pas du tout le cas pour les modèles compressibles pour lesquels la pression thermodynamique n'est pas constante : dans ce cas, l'appel aux équations d'état tabulées consiste à *fitter* une surface dépendant de l'enthalpie interne ET de la pression thermodynamique

## AXE ①. PERSPECTIVES

---

Appliquer ces deux approches à d'**autres fluides caloporteurs** en fonction des données expérimentales disponibles (*e.g.* sodium, sel fondu, eau supercritique) :

- *caler* les paramètres d'une EOS de type **gaz raidi**
- utiliser directement les données expérimentales en s'appuyant sur des **régressions polynomiales** à pression constante

# OUTLINE

- 1 Contexte générale de l'étude
- 2 État de l'art avant le projet NEEDS
- 3 Résultats obtenus grâce au soutien NEEDS 2014-2015 et perspectives**
  - AXE ①. Thermodynamique et équations d'état
  - **AXE ②. Enrichissement de la modélisation**
  - AXE ③. Analyse et schémas numériques
- 4 Manifestations scientifiques soutenues par NEEDS 2014-2015
- 5 Collaborations futures

## AXE ②. RÉSULTATS

Nous avons enrichi le modèle LMNC en prenant en compte **la conductivité thermique** afin de mieux modéliser les transferts de chaleur.

☞ S. DELLACHERIE, G. FACCANONI, B. GREC and Y. PENEL. *Study of a low Mach nuclear core model for two-phase flows with phase transition II : tabulated equation of state*. Soumis à Computers & Fluids.

☞ A. BONDESAN, S. DELLACHERIE, H. HIVERT, J. JUNG, V. LLERAS, C. MIETKA and Y. PENEL. *Study of a depressurization process at low Mach number in a nuclear reactor core*. Soumis à ESAIM : Proceedings. Article issu du projet DIPLOMA au CEMRACS-2015.

## AXE ②. PERSPECTIVES

---

- Généraliser le modèle au cas où la **pression thermodynamique dépend du temps**.
- Construire et étudier une **hiérarchie de modèles** bas Mach dits modèles  **$n$ -LMNC**, limites bas Mach de modèles compressibles à  $n$  équations :
  - 4-LMNC : limite bas Mach du modèle HRM à 4 équations utilisé dans Flica4,
  - 5-LMNC : limite bas Mach du modèle à 5 équations utilisé dans le code Triton,
  - 6-LMNC : limite bas Mach du modèle isobare à 6 équations utilisé dans Cathare et Flica4,
  - 7-LMNC : limite bas Mach du modèle de Baer-Nunziato à 7 équations.

## AXE ②. PERSPECTIVES

---

- Généraliser le modèle au cas où la **pression thermodynamique dépend du temps**.
- Construire et étudier une **hiérarchie de modèles** bas Mach dits modèles  **$n$ -LMNC**, limites bas Mach de modèles compressibles à  $n$  équations :
  - 4-LMNC : limite bas Mach du modèle HRM à 4 équations utilisé dans Flica4,
  - 5-LMNC : limite bas Mach du modèle à 5 équations utilisé dans le code Triton,
  - 6-LMNC : limite bas Mach du modèle isobare à 6 équations utilisé dans Cathare et Flica4,
  - 7-LMNC : limite bas Mach du modèle de Baer-Nunziato à 7 équations.

# OUTLINE

- 1 Contexte générale de l'étude
- 2 État de l'art avant le projet NEEDS
- 3 Résultats obtenus grâce au soutien NEEDS 2014-2015 et perspectives**
  - AXE ①. Thermodynamique et équations d'état
  - AXE ②. Enrichissement de la modélisation
  - **AXE ③. Analyse et schémas numériques**
- 4 Manifestations scientifiques soutenues par NEEDS 2014-2015
- 5 Collaborations futures

## AXE ③. CONSTAT

- La prise en compte de l'acoustique à bas nombre de Mach dans un code compressible pose problème
- Le modèle LMNC ne présente pas ces difficultés puisque les ondes acoustiques ont été filtrées :
  - schémas numériques 1D basés sur la méthode des caractéristiques, avec ou sans changement de phase, extrêmement performants car
    - peu coûteux (algorithmes explicites),
    - simples (montée en ordre aisée),
    - robustes (algorithmes inconditionnellement stables bien qu'explicites)

● M. BENOIST, S. DEJOURS, C. FACCANONI, B. GERT and Y. PEREZ, Study of a low Mach number solver model for gas flows flow with shock transition / laminar gas flow, *ESAIM: Mathematical Modeling and Numerical Analysis*, 2014.

- schéma numérique 2D couplant une méthode d'éléments finis à une méthode des caractéristiques (monophasique, gaz raidi).

● S. DEJOURS, C. FACCANONI, B. GERT, E. NORA and Y. PEREZ, 2D numerical simulation of a low Mach number gas flow with laminar gas flow, *ESAIM: Proceedings*, 2014. Article issu de l'intégration LMNC1 au congrès SMM 2013.



## AXE ③. CONSTAT

- La prise en compte de l'acoustique à bas nombre de Mach dans un code compressible pose problème
- Le modèle LMNC ne présente pas ces difficultés puisque les ondes acoustiques ont été filtrées :
  - schémas numériques 1D basés sur la méthode des caractéristiques, avec ou sans changement de phase, extrêmement performants car
    - peu coûteux (algorithmes explicites),
    - précis (montée en ordre aisée),
    - robustes (algorithmes inconditionnellement stables bien qu'explicites)

⇒ M. BERNARD, S. DELLACHERIE, G. FACCANONI, B. GREC and Y. PENEL. *Study of a low Mach nuclear core model for two-phase flows with phase transition I : stiffened gas law*. ESAIM : Mathematical Modelling and Numerical Analysis, 2014

- schéma numérique 2D couplant une méthode d'éléments finis à une méthode des caractéristiques (monophasique, gaz raidi).

⇒ S. DELLACHERIE, G. FACCANONI, B. GREC, E. NAYIR and Y. PENEL. *2D numerical simulation of a low Mach nuclear core model with stiffened gas using FreeFem++*. ESAIM : Proceedings, 2014. Article issu du minisymposium NUMACH au congrès SMAI-2013.

## AXE ③. CONSTAT

- La prise en compte de l'acoustique à bas nombre de Mach dans un code compressible pose problème
- Le modèle LMNC ne présente pas ces difficultés puisque les ondes acoustiques ont été filtrées :
  - schémas numériques 1D basés sur la méthode des caractéristiques, avec ou sans changement de phase, extrêmement performants car
    - **peu coûteux** (algorithmes explicites),
    - **précis** (montée en ordre aisée),
    - **robustes** (algorithmes inconditionnellement stables bien qu'explicites)

⇒ M. BERNARD, S. DELLACHERIE, G. FACCANONI, B. GREC and Y. PENEL. *Study of a low Mach nuclear core model for two-phase flows with phase transition I : stiffened gas law*. ESAIM : Mathematical Modelling and Numerical Analysis, 2014

- schéma numérique 2D couplant une méthode d'éléments finis à une méthode des caractéristiques (monophasique, gaz raidi).

⇒ S. DELLACHERIE, G. FACCANONI, B. GREC, E. NAYIR and Y. PENEL. *2D numerical simulation of a low Mach nuclear core model with stiffened gas using FreeFem++*. ESAIM : Proceedings, 2014. Article issu du minisymposium NUMACH au congrès SMAI-2013.

## AXE ③. CONSTAT

- La prise en compte de l'acoustique à bas nombre de Mach dans un code compressible pose problème
- Le modèle LMNC ne présente pas ces difficultés puisque les ondes acoustiques ont été filtrées :
  - schémas numériques 1D basés sur la méthode des caractéristiques, avec ou sans changement de phase, extrêmement performants car
    - **peu coûteux** (algorithmes explicites),
    - **précis** (montée en ordre aisée),
    - **robustes** (algorithmes inconditionnellement stables bien qu'explicites)

⇒ M. BERNARD, S. DELLACHERIE, G. FACCANONI, B. GREC and Y. PENEL. *Study of a low Mach nuclear core model for two-phase flows with phase transition I : stiffened gas law*. ESAIM : Mathematical Modelling and Numerical Analysis, 2014

- schéma numérique 2D couplant une méthode d'éléments finis à une méthode des caractéristiques (monophasique, gaz raidi).

⇒ S. DELLACHERIE, G. FACCANONI, B. GREC, E. NAYIR and Y. PENEL. *2D numerical simulation of a low Mach nuclear core model with stiffened gas using FreeFem++*. ESAIM : Proceedings, 2014. Article issu du minisymposium NUMACH au congrès SMAI-2013.

## AXE ③. RÉSULTATS

- Généralisation au changement de phase et aux EOS tabulées des schémas numériques proposés précédemment
- Étude (en 1D) de la préservation de la positivité de la température
- Prise en compte de la conduction thermique
- Couplage d'un modèle compressible avec un modèle bas Mach

Le code 2D utilise le code open source FreeFem++

⇒ S. DELLACHERIE, G. FACCANONI, B. GREC and Y. PENEL. *Study of a low Mach nuclear core model for two-phase flows with phase transition II : tabulated equation of state*. Soumis à Computers & Fluids.

⇒ A. BONDESAN, S. DELLACHERIE, H. HIVERT, J. JUNG, V. LLERAS, C. MIETKA and Y. PENEL. *Study of a depressurization process at low Mach number in a nuclear reactor core*. Soumis à ESAIM : Proceedings. Article issu du projet DIPLOMA au CEMRACS-2015.

⇒ B. DESPRÉS, Y. PENEL and S. DELLACHERIE. *Coupling strategies for compressible – low Mach number flows*. ESAIM : Math. Models and Methods in Appl. Sci., 2015

## AXE ③. PERSPECTIVES

- Adapter le code 2D en 3D
- Appliquer le code 3D au cas d'un chauffage dissymétrique entre deux sous-canaux (et donc d'éventuels phénomènes de redistribution de débit).
- Étudier le cas d'une porosité non-constante dans le cœur d'un REP.

Un projet de recherche sur le **HPC** orienté vers l'étude d'un cas **3D** avec **parallélisation** via décomposition de domaine sera proposé aux organisateurs du CEMRACS-2016.

# OUTLINE

---

- 1 Contexte générale de l'étude
- 2 État de l'art avant le projet NEEDS
- 3 Résultats obtenus grâce au soutien NEEDS 2014-2015 et perspectives
- 4 Manifestations scientifiques soutenues par NEEDS 2014-2015**
- 5 Collaborations futures

## MANIFESTATIONS SCIENTIFIQUES ET STAGES

- Colloque «Écoulement à basse vitesse — Application aux régimes bas Mach et bas Froude», 5-6 nov. 2015, Université Paris Descartes

Ce colloque<sup>2</sup> a rassemblé les membres du projet et des experts nationaux et internationaux, soit plus d'une centaine de personnes.



- CEMRACS 2015, projet DIPLOMA «Study of a Depressurlation Process at LOW MACH number in a nuclear core reactor», juillet-août 2015, CIRM.

2 membres du projet NEEDS, 2 maîtres de conférence, 3 étudiants en thèse

- **Stage** d'Adriano Negrìs, ENSTA-ParisTech, mai-août 2014.

2. Soutenu financièrement  $\approx 50\%$  par les défis NEEDS 2014 et 2015,  $\approx 50\%$  par AMIES, INRIA, IdF, FMJH, Université Paris Descartes, MAP5, UPMC

# OUTLINE

- 1 Contexte générale de l'étude
- 2 État de l'art avant le projet NEEDS
- 3 Résultats obtenus grâce au soutien NEEDS 2014-2015 et perspectives
- 4 Manifestations scientifiques soutenues par NEEDS 2014-2015
- 5 Collaborations futures



## COLLABORATIONS FUTURES

---

- Collaborations déjà en cours
  - O. LAFITTE (CEA Saclay & Université Paris 13)
  - A. MEKKAS (CEA Saclay)
  - J. JUNG (Université de Pau et des Pays de l'Adour)
  
- Thèmes de recherche envisagés
  - étude d'**autres fluides caloporteurs** en fonction des données expérimentales disponibles (e.g. sodium, sel fondu, eau supercritique)
  - couplage **neutronique/thermohydraulique** bas Mach