



énergie atomique • énergies alternatives



Soudage par résistance du gainage combustible en acier ODS

Identification des phénomènes physiques en vue d'une optimisation

Fabien Corpace^{a,b}, Arnaud Monnier^a, Jean-Pierre Manaud^b, Angéline Poulon Quintin^b

^a CEA, DEN, DM2S, SEMT, LTA, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

^b CNRS, Université Bordeaux 1, ICMCB, UPR9048, 33608 PESSAC Cedex, France

Action tripartite : CEA, EDF, AREVA NP

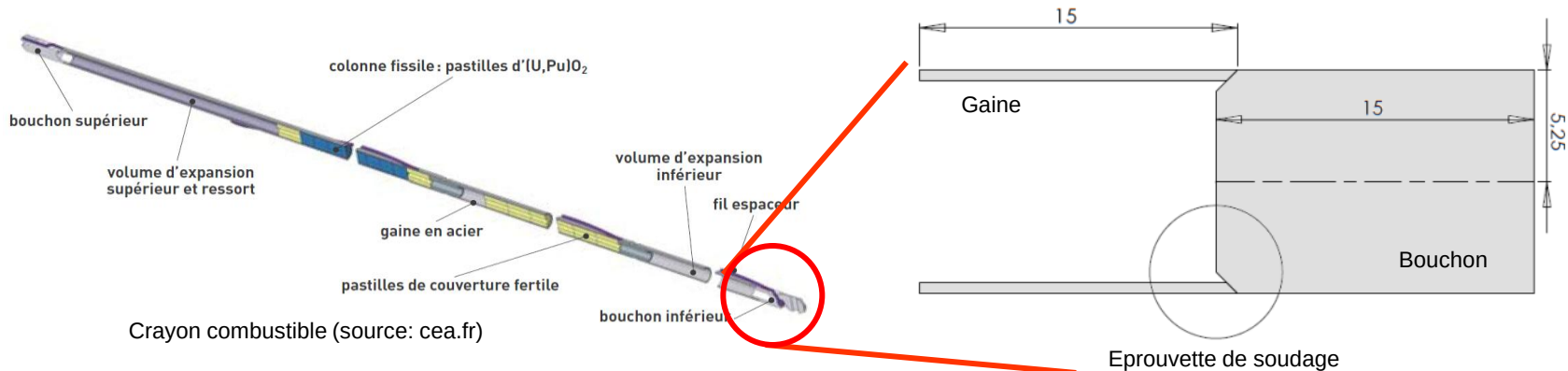
Contexte – Gainages combustibles en acier ODS



énergie atomique • énergies alternatives



- Le gainage combustible est le premier confinement du combustible



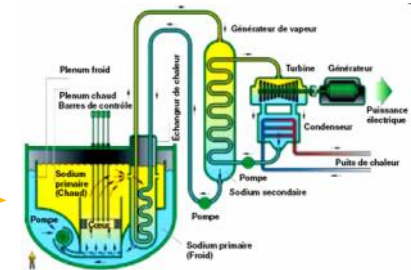
RNR-Na actuel

Diminution des déformations admissibles



Aciers
austénitiques

**Aciers
ODS**



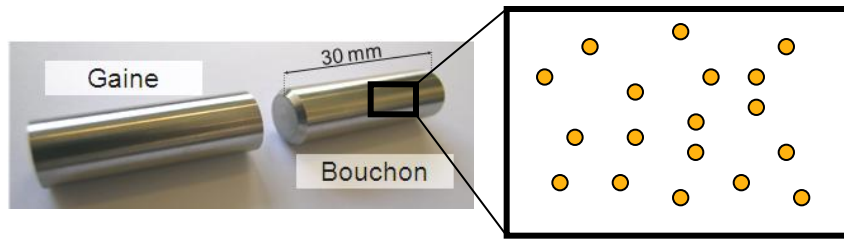
RNR-Na Génération IV

- Aciers inoxydables ODS (Oxide Dispersion Strengthened): renforcement par dispersion d'oxydes nanométriques
 - Meilleure tenue mécanique à haute température assurée par la dispersion d'oxydes nanométriques (Température de fonctionnement nominale des RNR-Na GenIV: 500 - 650°C)

Contexte – Le soudage des aciers ODS



énergie atomique • énergies alternatives

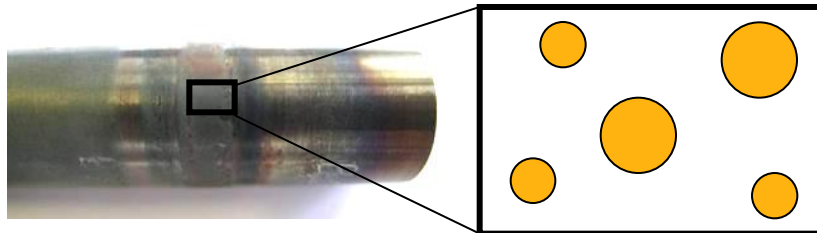


Oxydes nanométriques,
densité élevée

Bonnes propriétés mécaniques
à haute température



Soudage par
fusion



Exemple de soudure réalisée
par le procédé TIG

Modification de la taille
des oxydes, faible densité

Dégradation des propriétés
mécaniques à haute température
et de la durée de vie



Regroupement des
oxydes lors de la
fusion des aciers
ODS



Diminution
des
propriétés
mécaniques



**Procédé de
soudage par
fusion complexe
à mettre en œuvre**



Soudage
en phase
solide

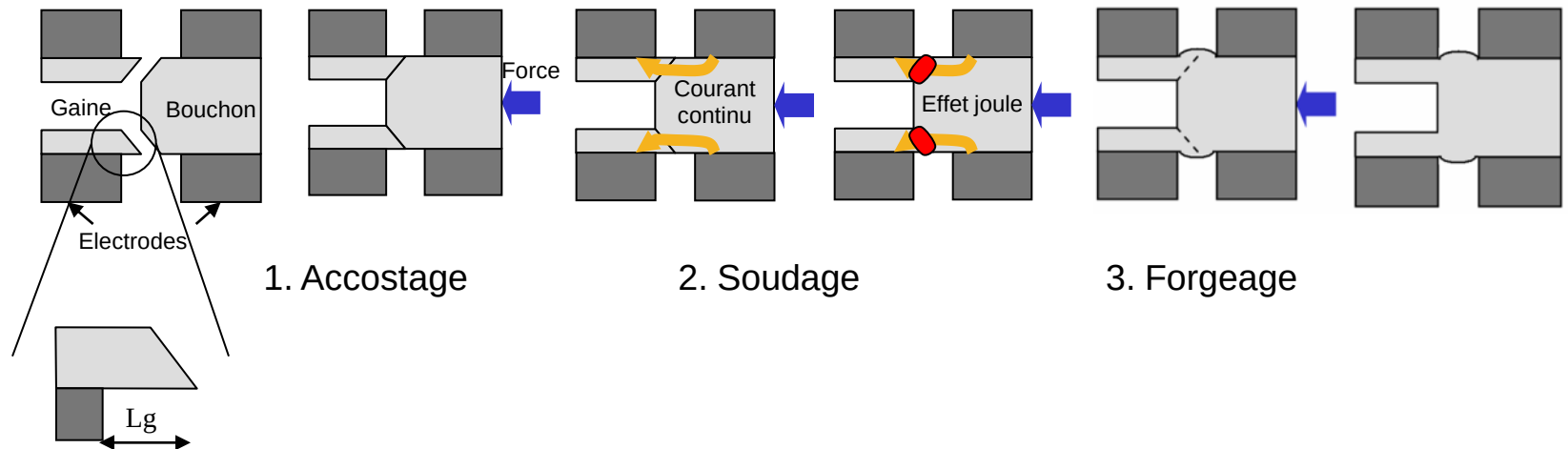


**Soudage par
résistance**

Contexte - Le soudage par résistance en bout



energie atomique • énergies alternatives

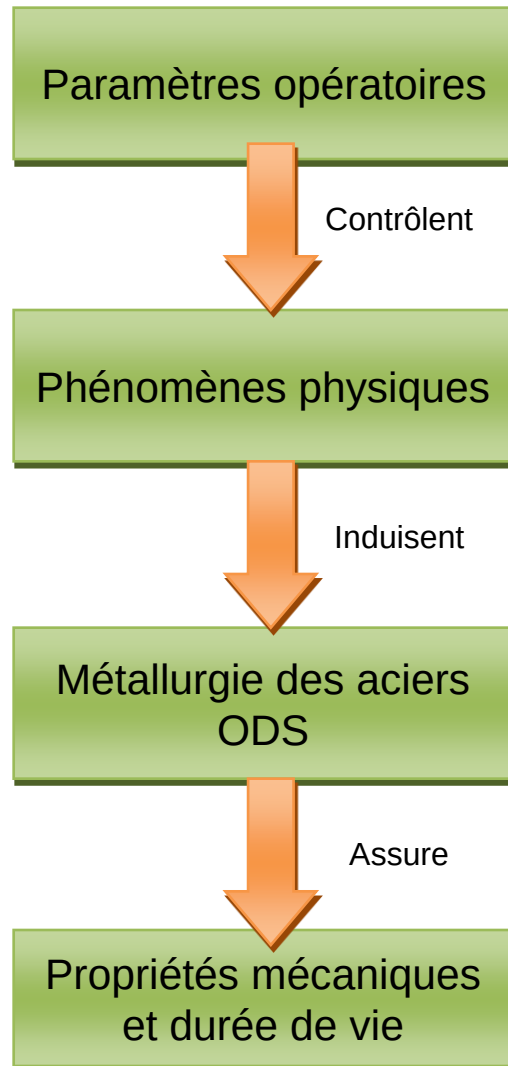


- Paramètres opératoires principaux du soudage par résistance en bout (F_s , I_s , t_s , L_g)
 - Force (F_s): Force appliquée en cours de soudage
 - Courant (I_s): Intensité du courant traversant les pièces
 - Temps (t_s): Temps d'application du courant
 - Longueur de gaine dépassant de l'électrodes (L_g)
- Forgeage des pièces chauffées par effet Joule  Soudage en phase solide

Méthodologie générale de l'étude



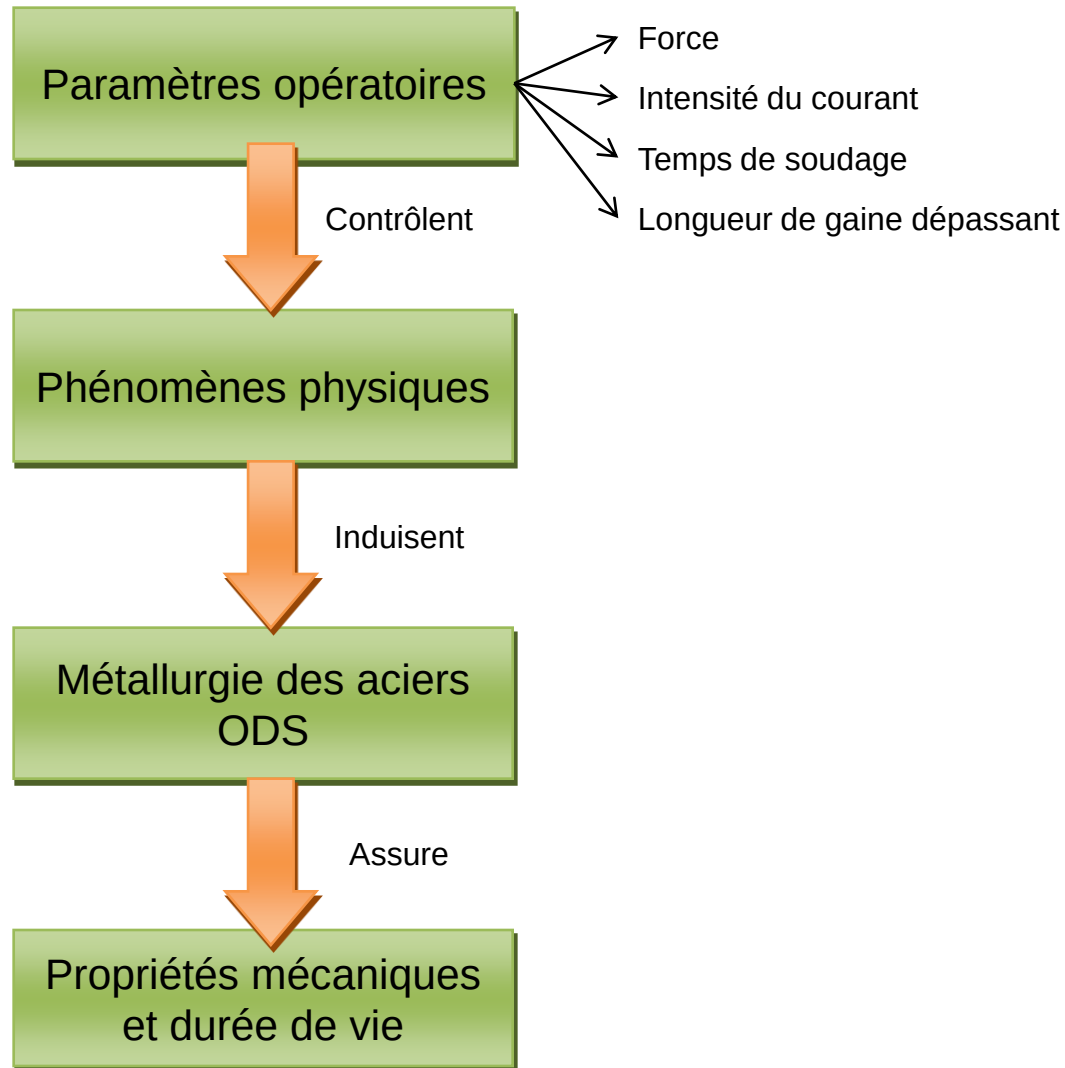
énergie atomique • énergies alternatives



Méthodologie générale de l'étude



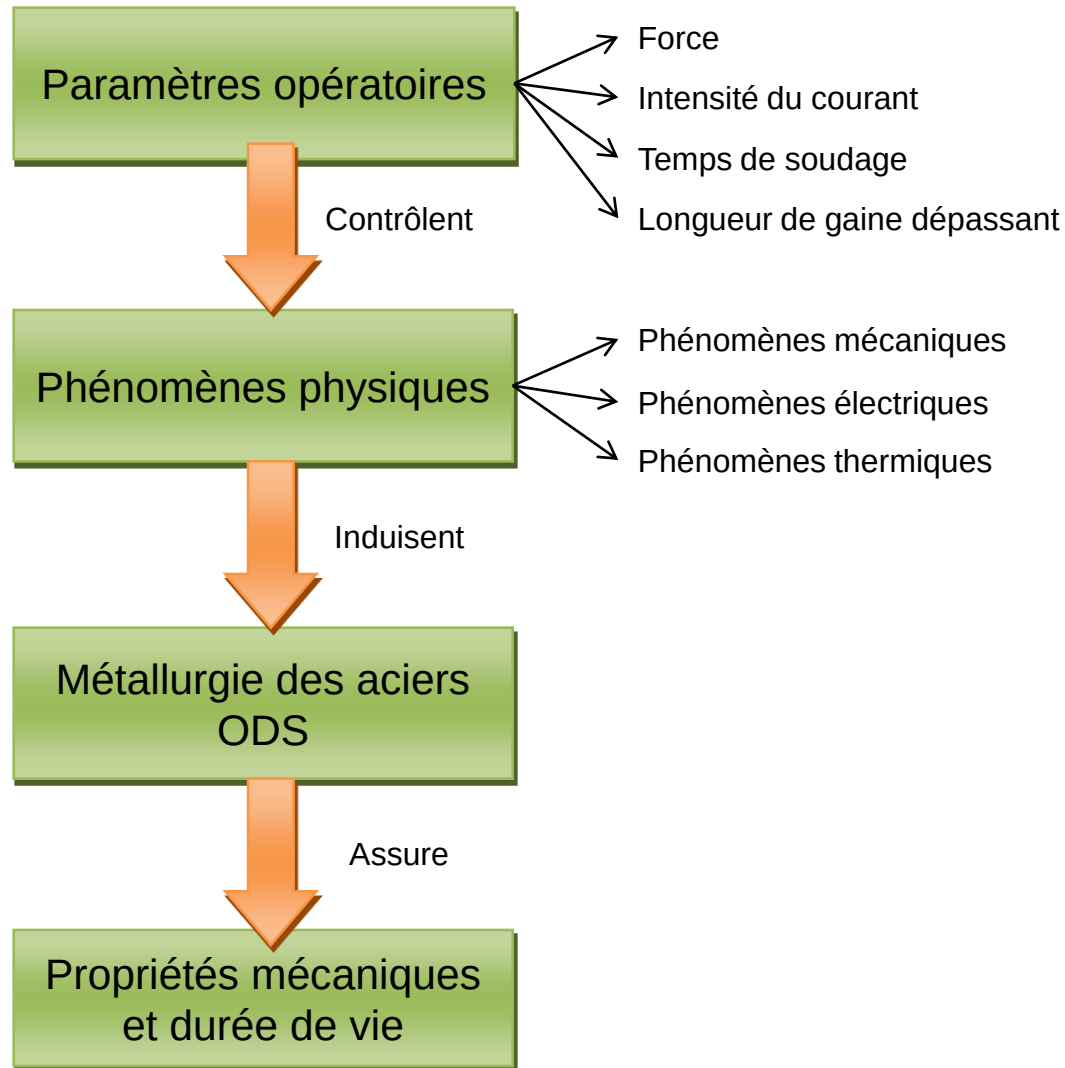
énergie atomique • énergies alternatives



Méthodologie générale de l'étude



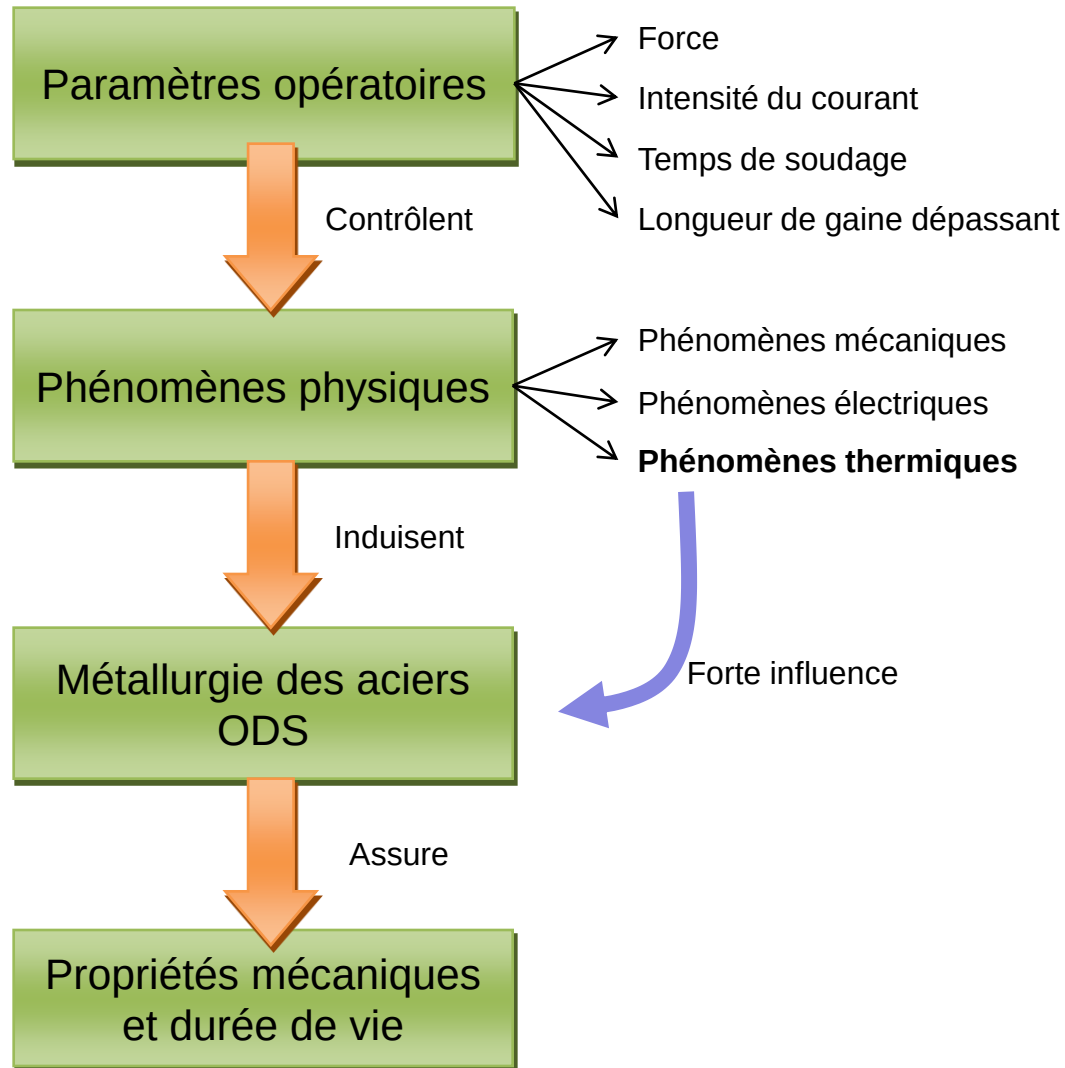
énergie atomique • énergies alternatives



Méthodologie générale de l'étude



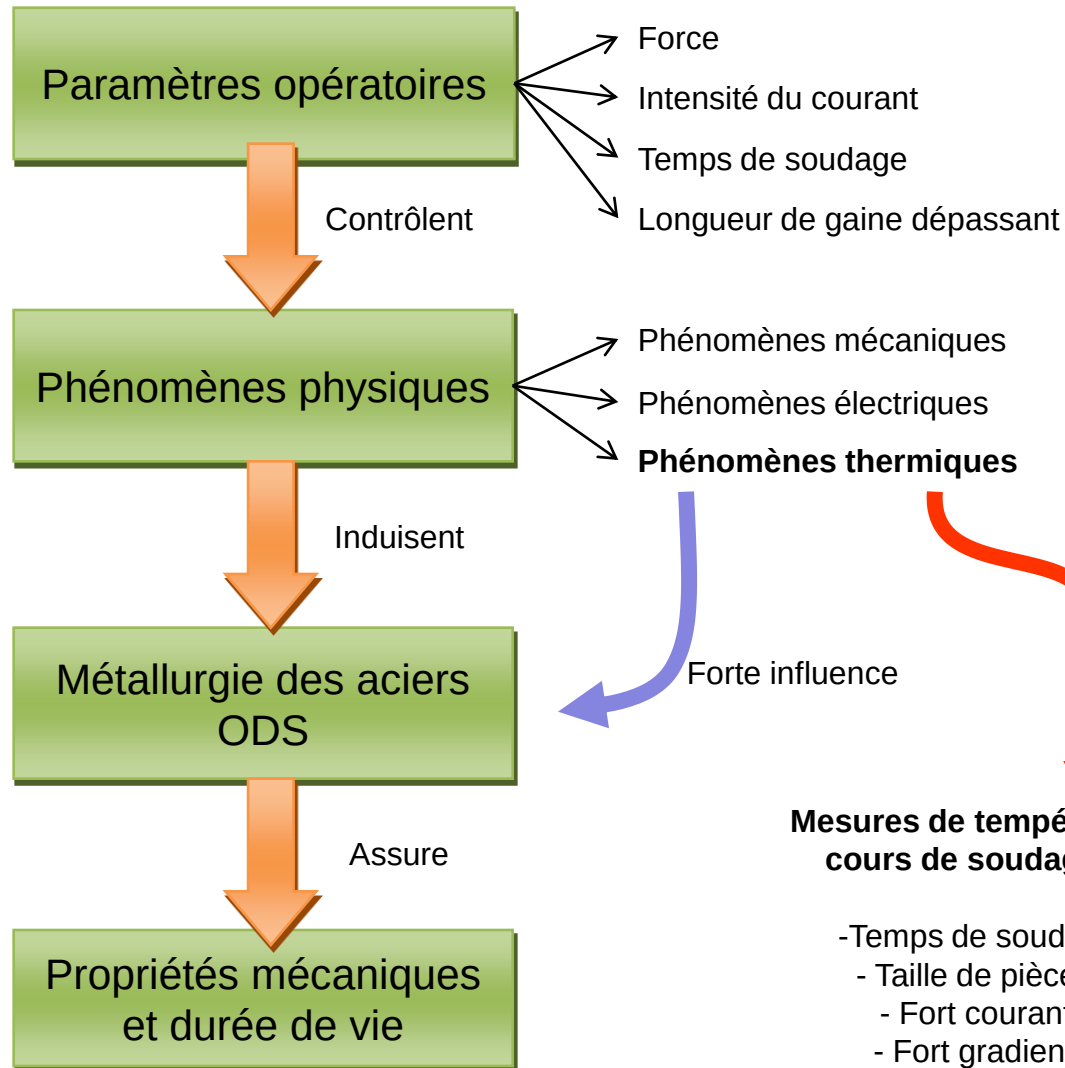
énergie atomique • énergies alternatives



Méthodologie générale de l'étude



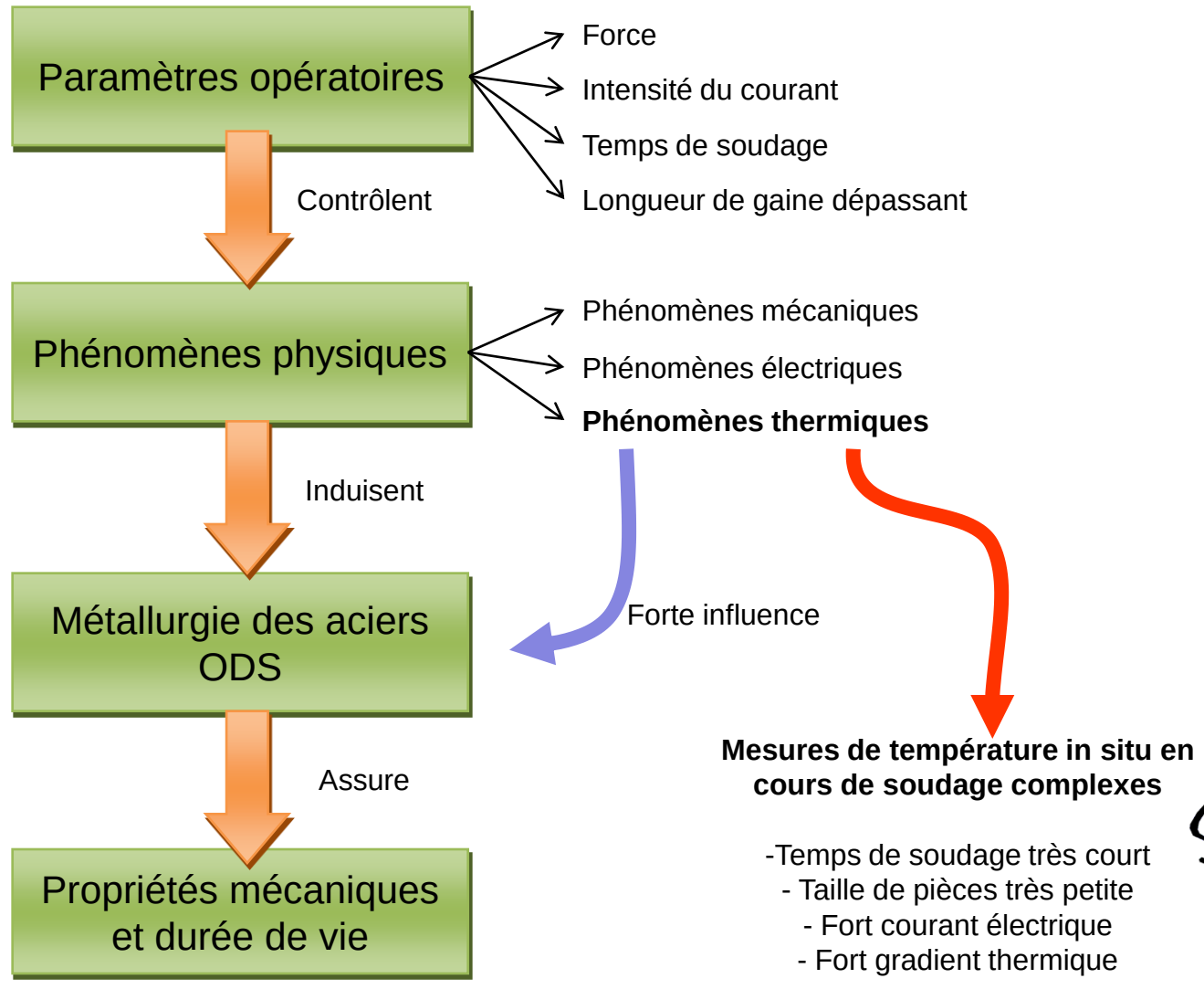
énergie atomique • énergies alternatives



Méthodologie générale de l'étude



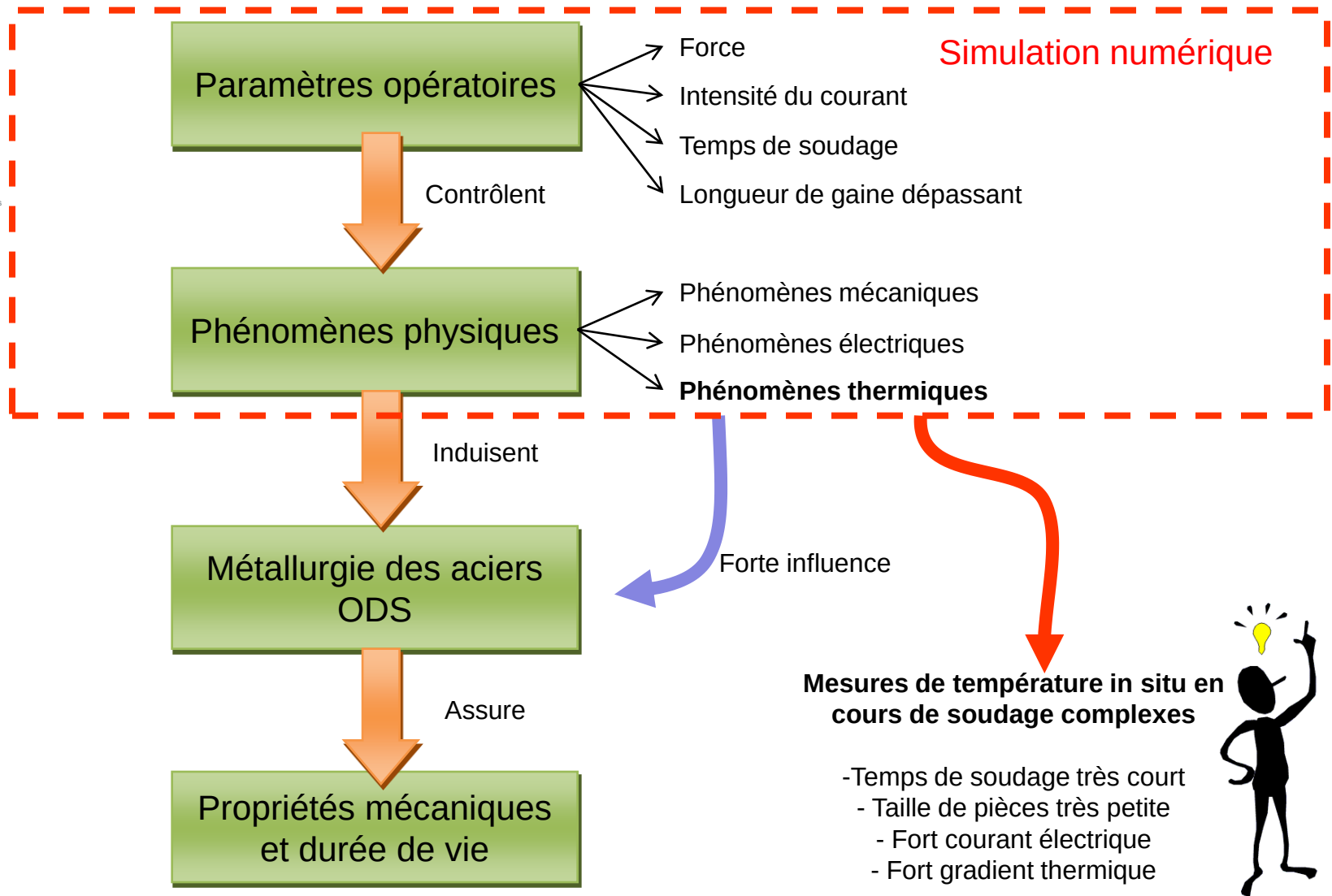
énergie atomique • énergies alternatives



Méthodologie générale de l'étude



énergie atomique • énergies alternatives



Méthodologie générale de l'étude



énergie atomique • énergies alternatives



Paramètres opératoires

Contrôlent



Phénomènes physiques

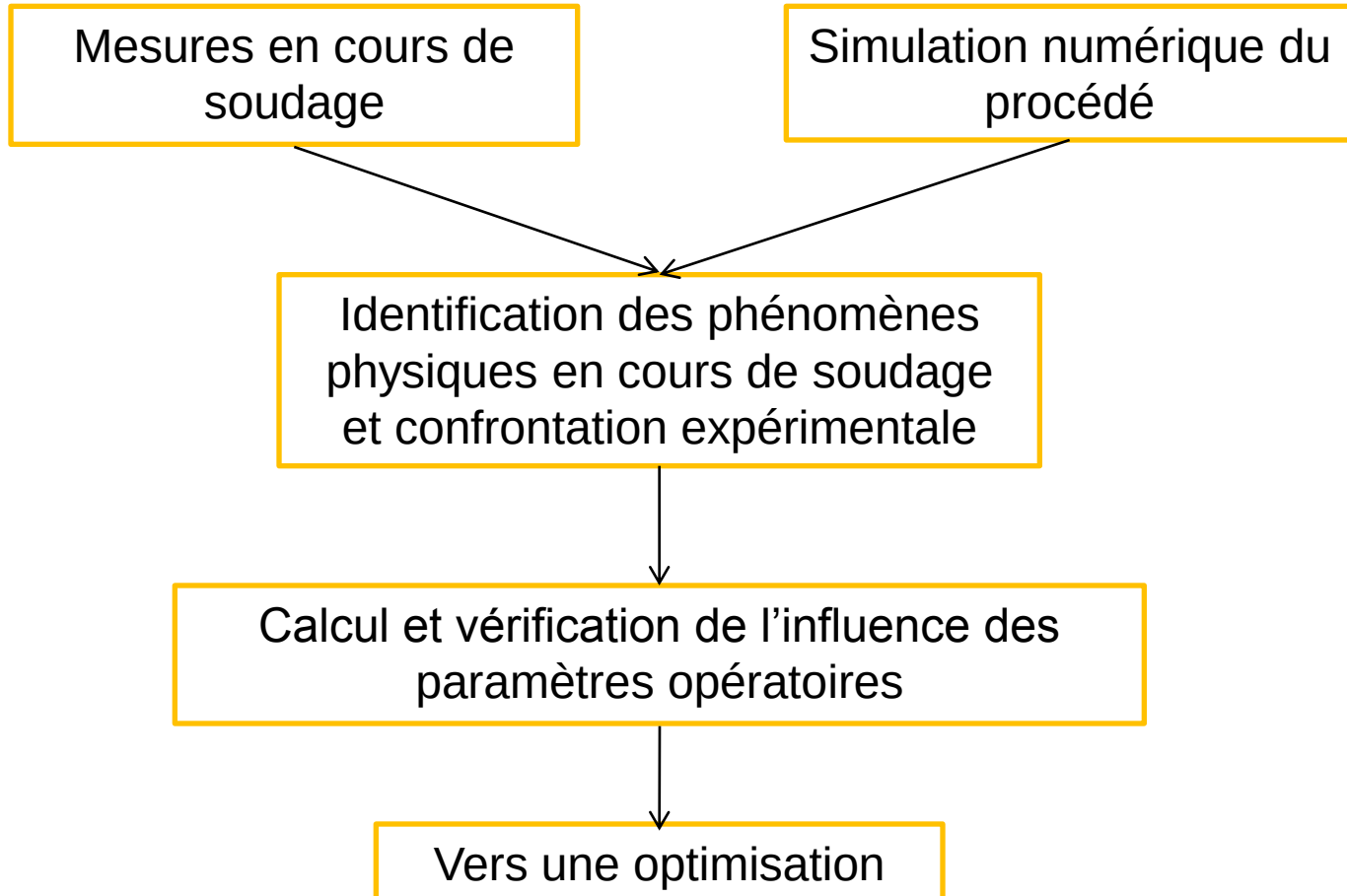
Simulation numérique

La simulation rend-elle bien
compte des phénomènes
physiques ?



Puis-je utiliser la
simulation pour
optimiser le procédé et
éviter la ruine de la
structure ?

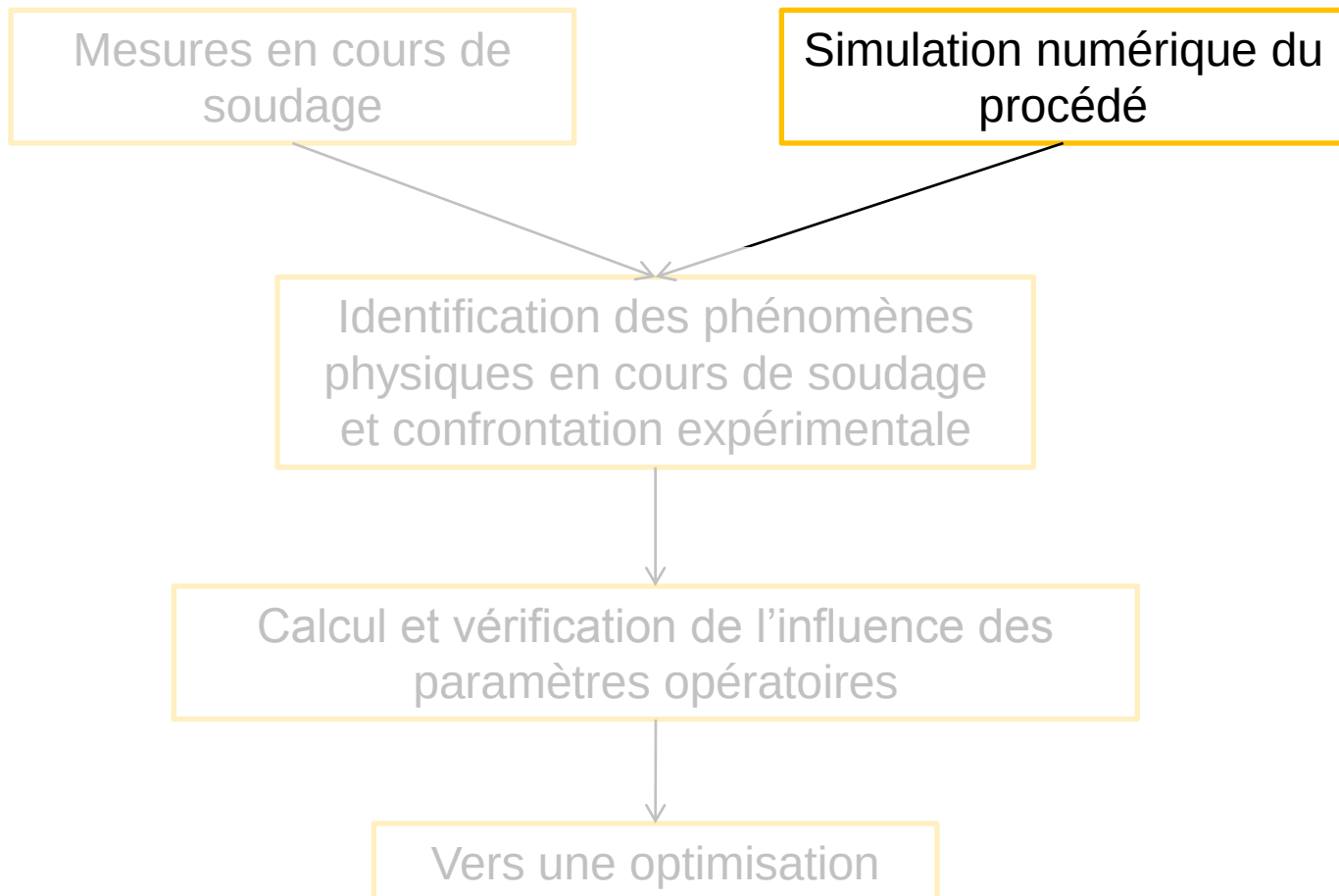




Plan



énergie atomique • énergies alternatives



Simulation numérique - Méthodes et objectifs



énergie atomique • énergies alternatives



- Simulation numérique réalisée avec SYSWELD (ESI)
- Objectif:
 - Donner accès à des informations fiables sur **l'influence des paramètres opératoires** sur les phénomènes physiques en cours de soudage
- Contrainte:
 - Développer une simulation numérique robuste afin de pouvoir réaliser des simulations sur l'ensemble de la plage de soudabilité opératoire étudiée

	Facteur	Minimum	Maximum
F_s	Force	1800 N	2200 N
I_s	Intensité du courant	14 kA	18 kA
t	Temps de soudage	10 ms	15 ms
L_g	Longueur de gaine dépassant de l'électrode	0,2 mm	0,8 mm

Plage de soudabilité opératoire étudiée

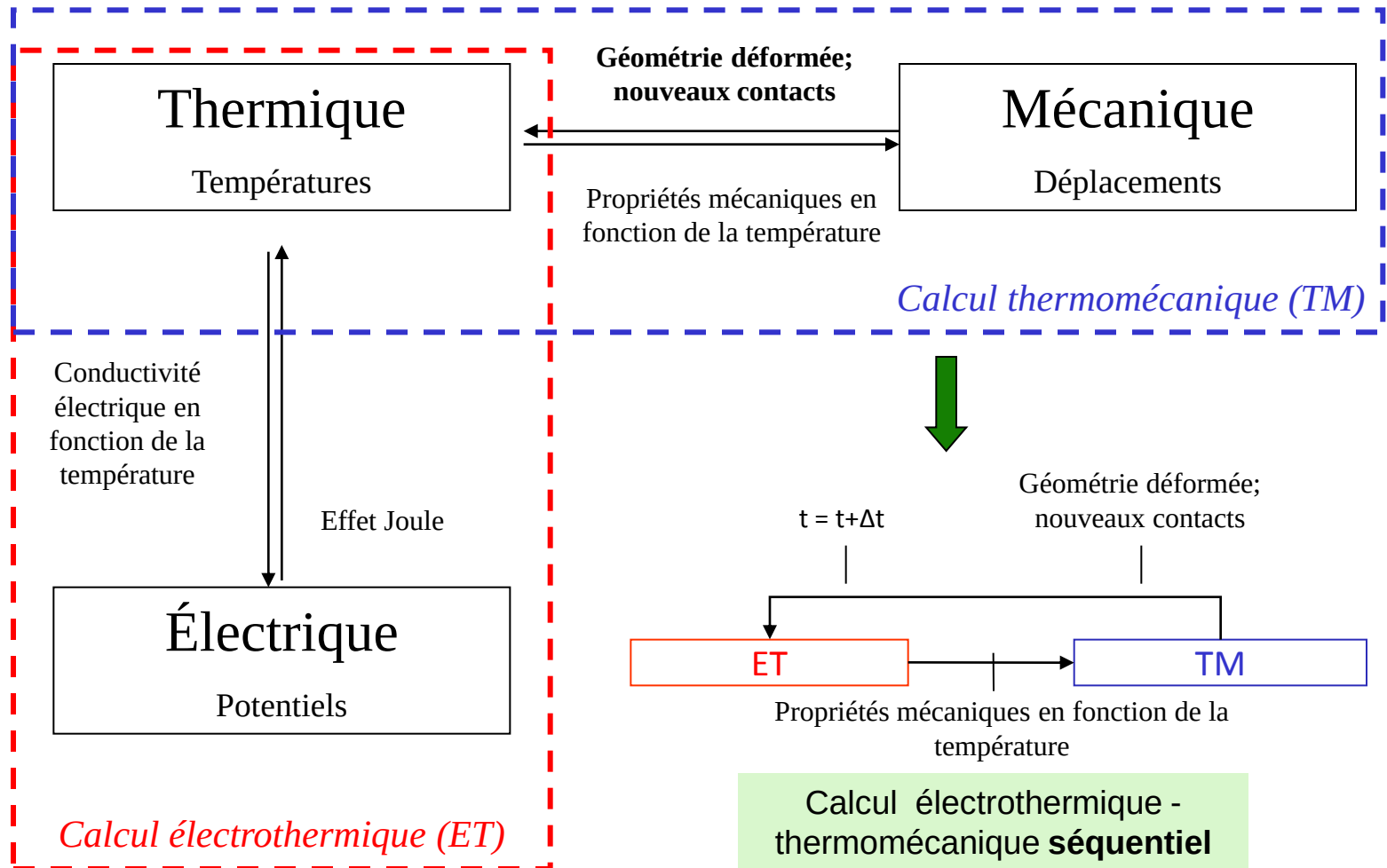
Simulation numérique - Phénomènes physiques



énergie atomique • énergies alternatives



- Phénomènes simulés pour le soudage par résistance (représentation simplifiée)



Simulation numérique - Conditions aux limites, chargements



énergie atomique • énergies alternatives

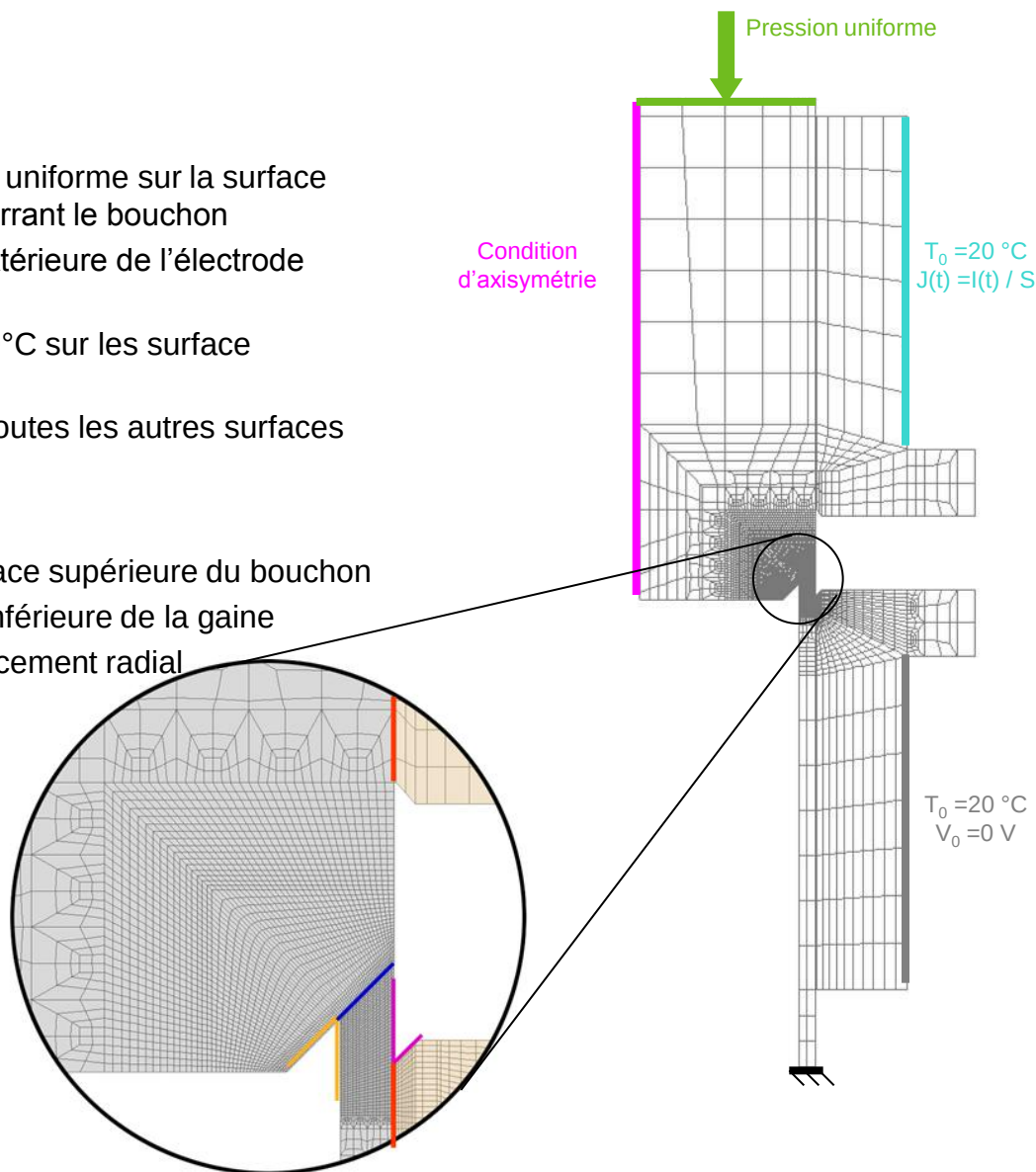


- Modèle 2D axisymétrique
- Modèle électrothermique (ET)
 - Densité de courant électrique uniforme sur la surface extérieure de l'électrode enserrant le bouchon
 - Potentiel nul sur la surface extérieure de l'électrode enserrant la gaine
 - Température constante de 20°C sur les surface extérieurs des électrodes
 - Conditions adiabatiques sur toutes les autres surfaces

- Modèle thermomécanique (TM)
 - Pression uniforme sur la surface supérieure du bouchon
 - Encastrement de la surface inférieure de la gaine
 - Électrodes bloquées en déplacement radial

- Contacts ETM

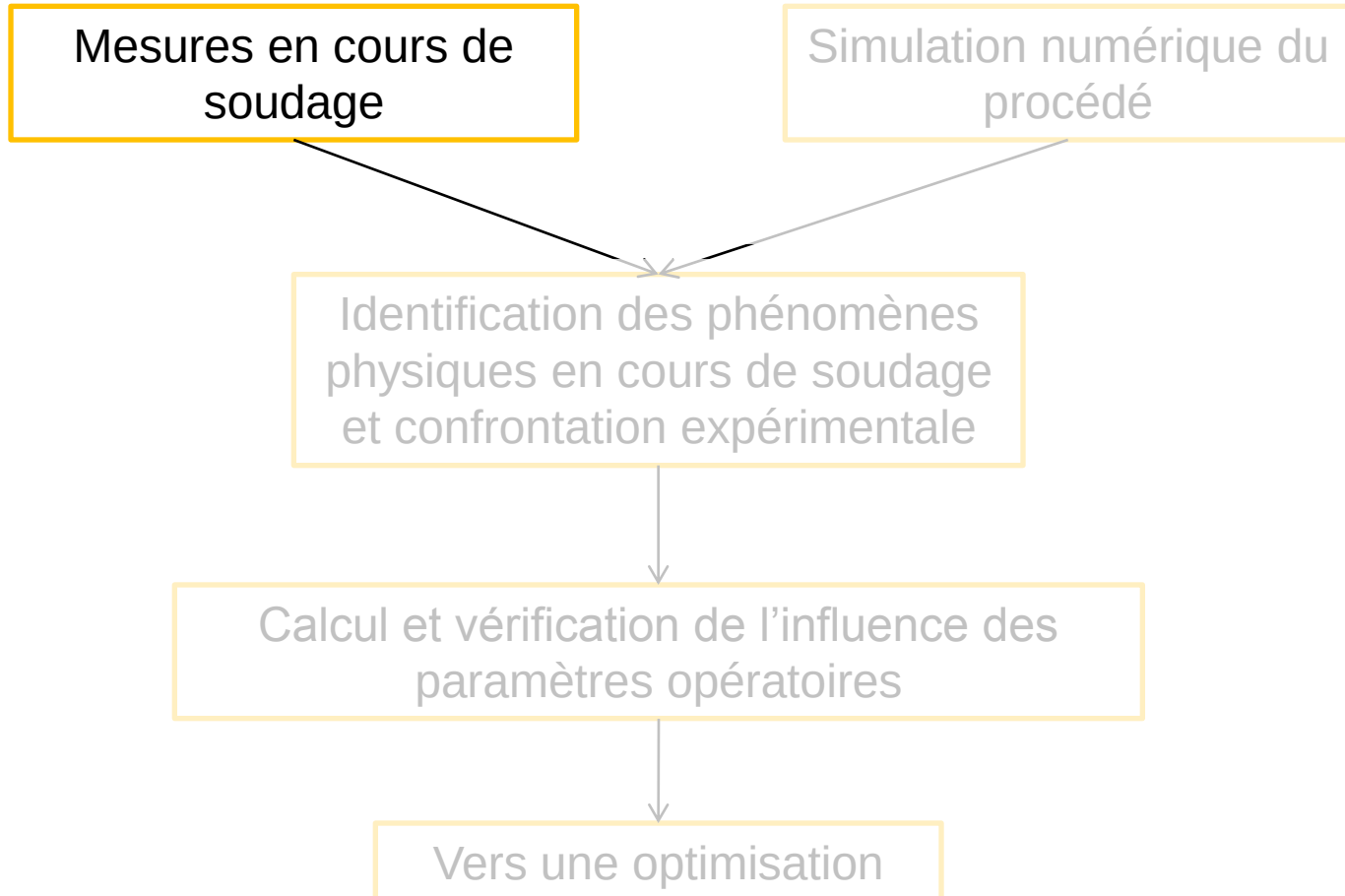
- Entre pièces
 - Préexistants
 - Formés en cours de soudage
- Entre pièces et mors
 - Préexistants
 - Formés en cours de soudage



Plan



énergie atomique • énergies alternatives



Mesures en cours de soudage



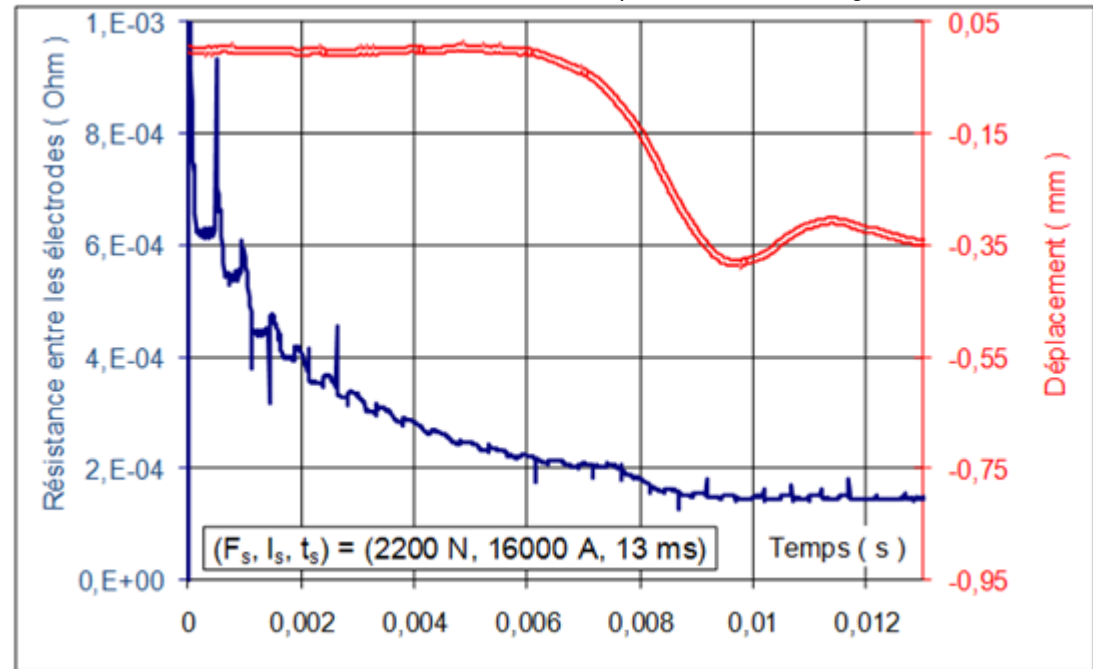
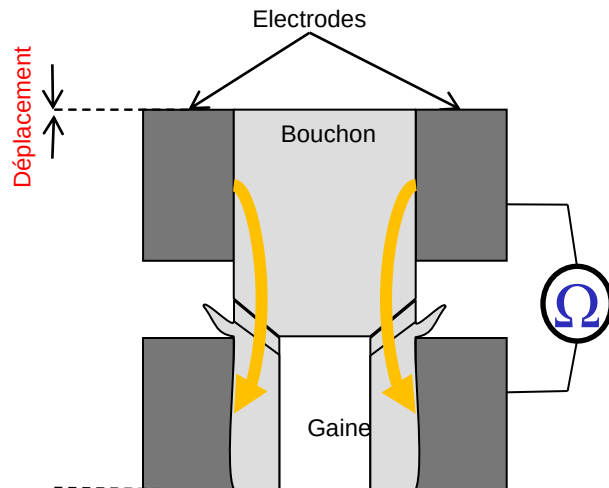
énergie atomique • énergies alternatives



- Essais réalisés sur une installation expérimentale spécifique
- Instrumentation à haute fréquence d'échantillonnage
 - Résistance électrique
 - Déplacement
 - ...



Installation expérimentale de soudage

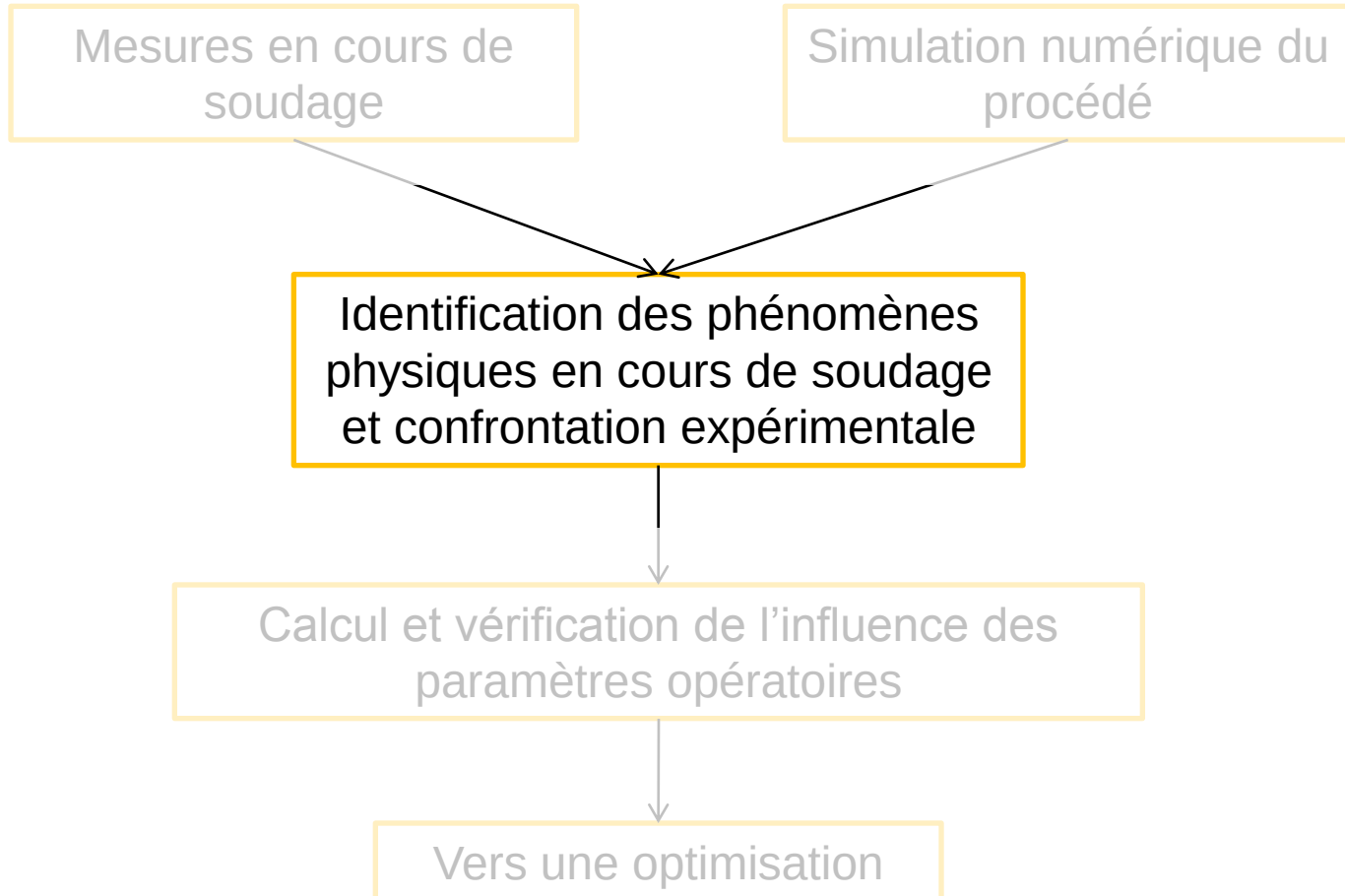


Mesures réalisées sur le point central de la plage de soudabilité

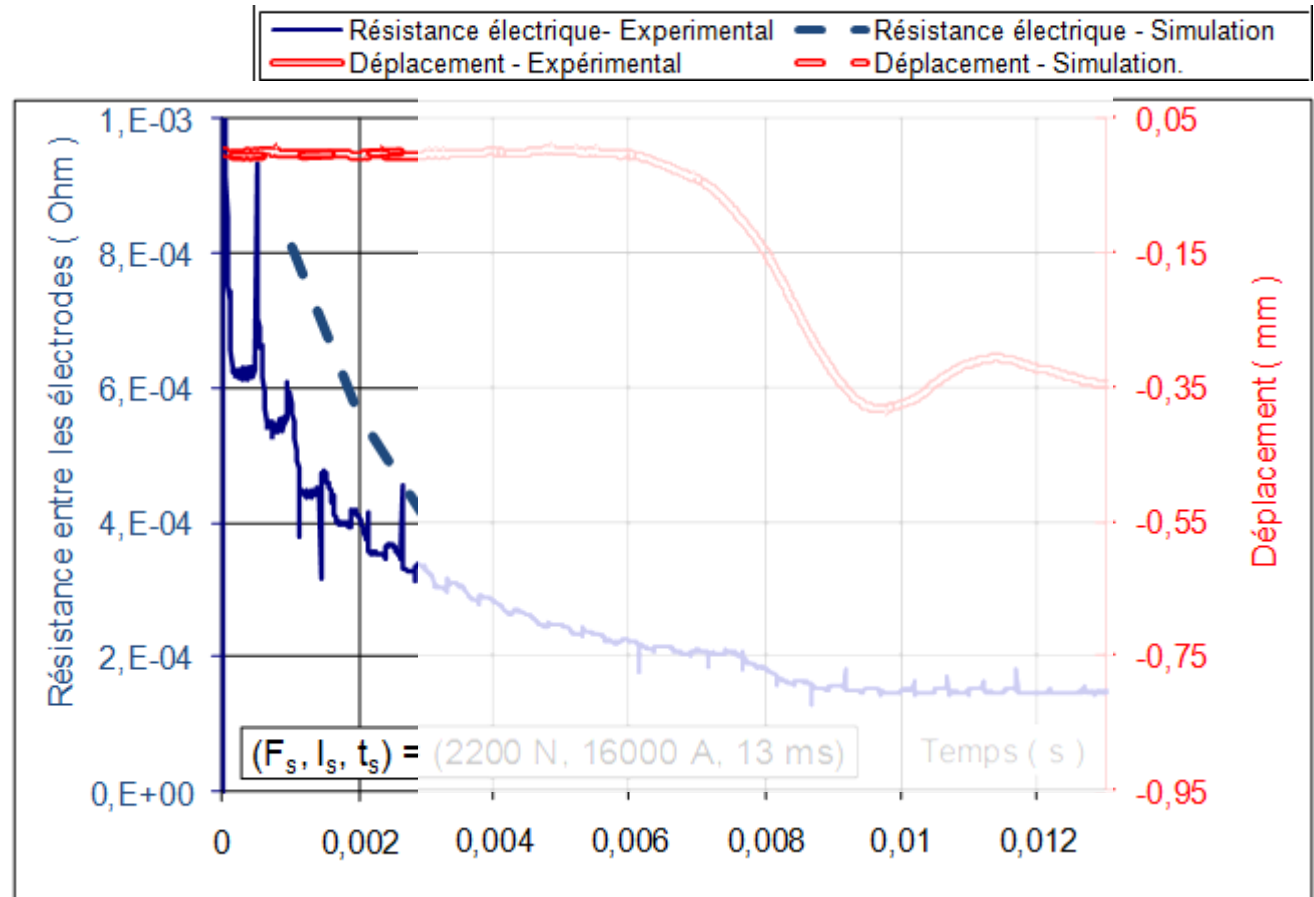
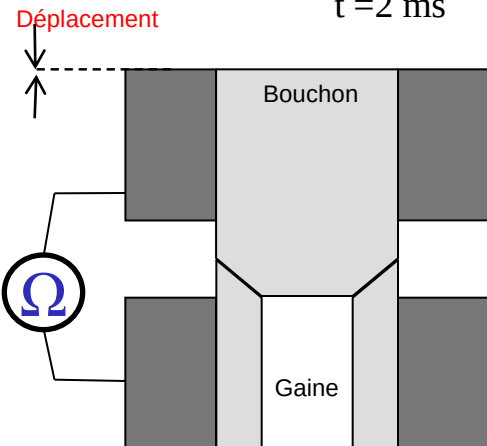
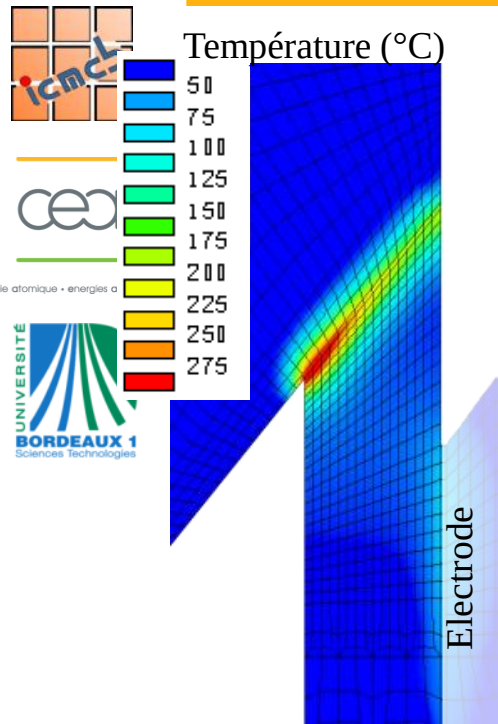
Plan



énergie atomique • énergies alternatives

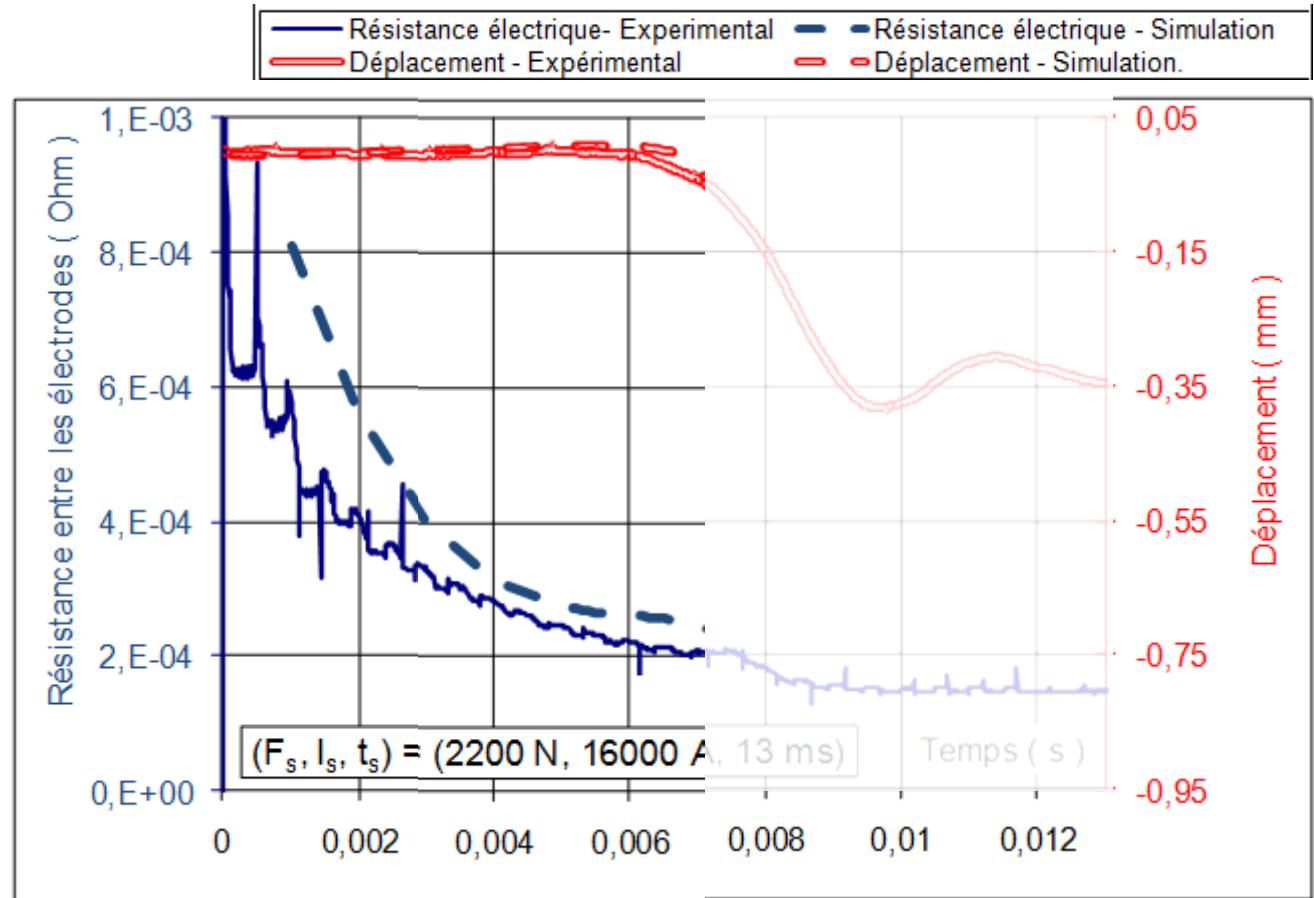
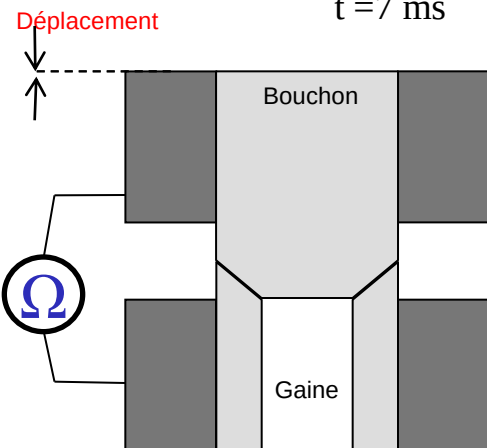
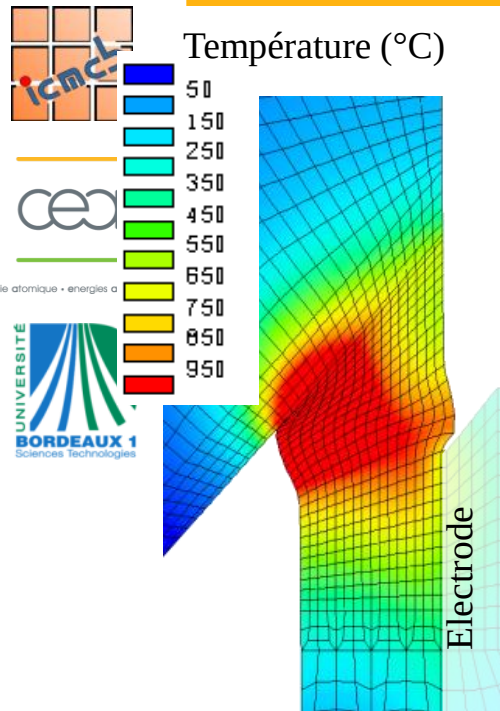


Identification des phénomènes physiques



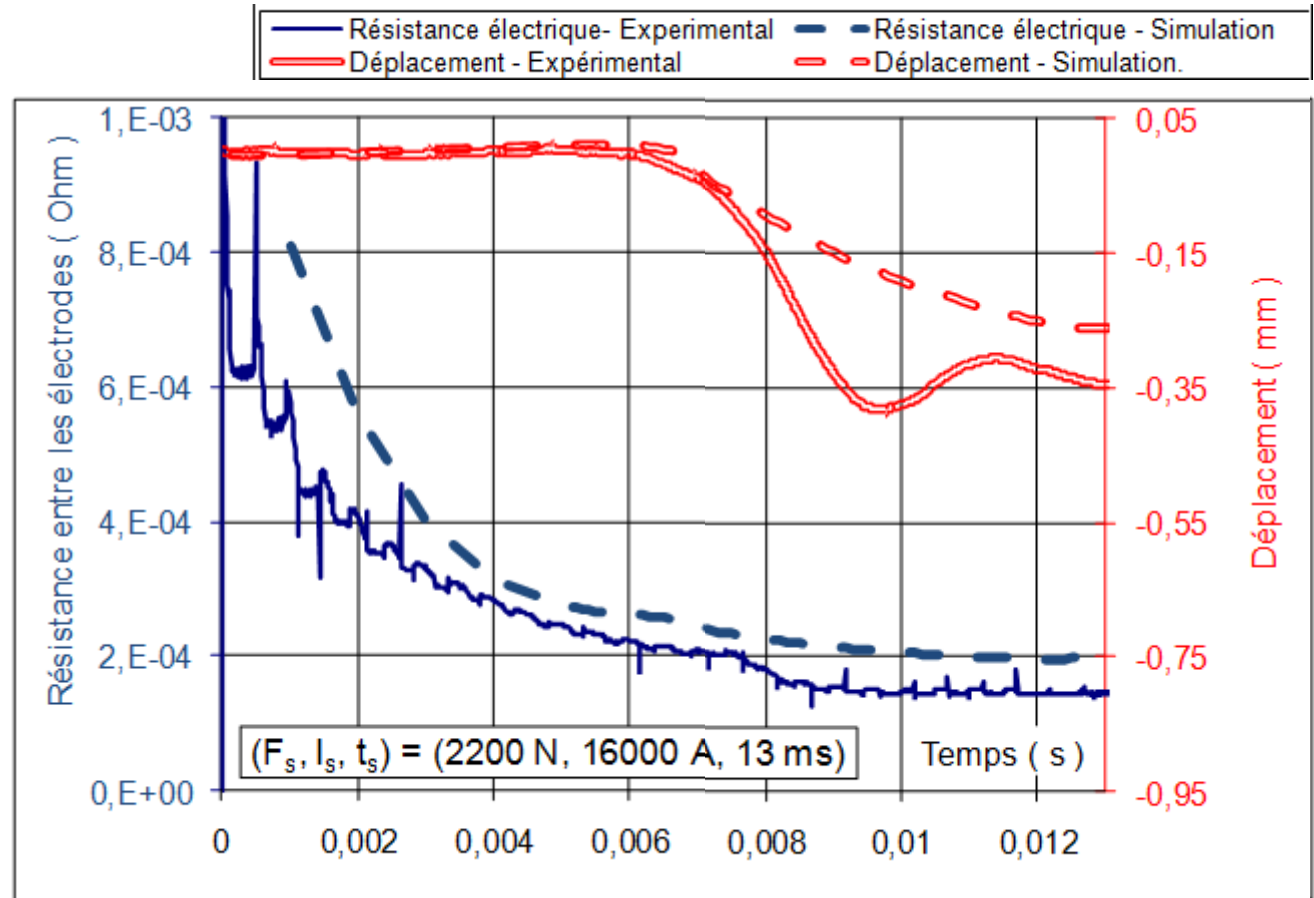
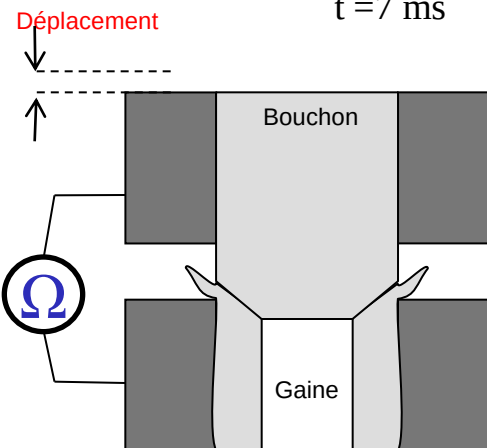
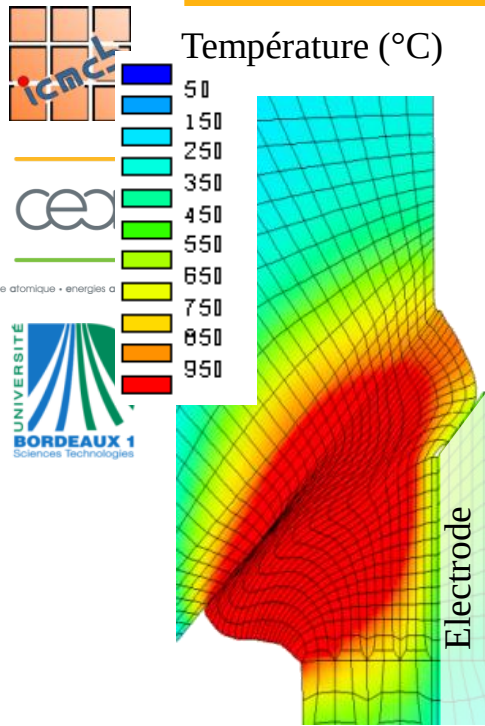
- $t = 2 \text{ ms}$: Chauffage des interfaces
 → Diminution des résistances de contact électrique
 → Simulation représentative du phénomène

Identification des phénomènes physiques



- $t = 7 \text{ ms}$: Chauffage des volumes
 - La température dans les volumes augmente entrainant l'affaissement
 - Simulation représentative du phénomène

Identification des phénomènes physiques



- t = 13 ms : Affaissement de la gaine
→ La gaine chauffée s'affaisse sous la force considérée
→ Simulation représentative du phénomène

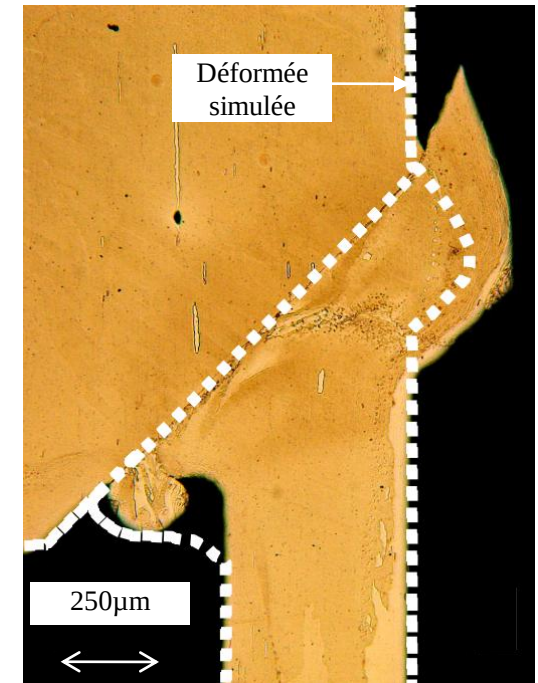
Identification des phénomènes physiques



énergie atomique • énergies alternatives



- Comparaison de la déformée finale observée après découpe de la soudure avec la déformée simulée
- La zone la plus déformée est la partie de gaine dépassant de l'électrode
 - Simulation représentative de ce phénomène
- Différences observées sur la forme et la taille des bourrelets
 - Hypothèse : Observation d'un glissement de la gaine non pris en compte par la simulation pouvant modifier la forme de la soudure
 - Hypothèse : Propriétés mécaniques à hautes températures extrapolées à partir des données de la littérature entraînant une différence de comportement



Comparaison de la déformée simulée de la soudure avec la forme observée par microscopie optique (après attaque métallographique)

Conclusion partielle

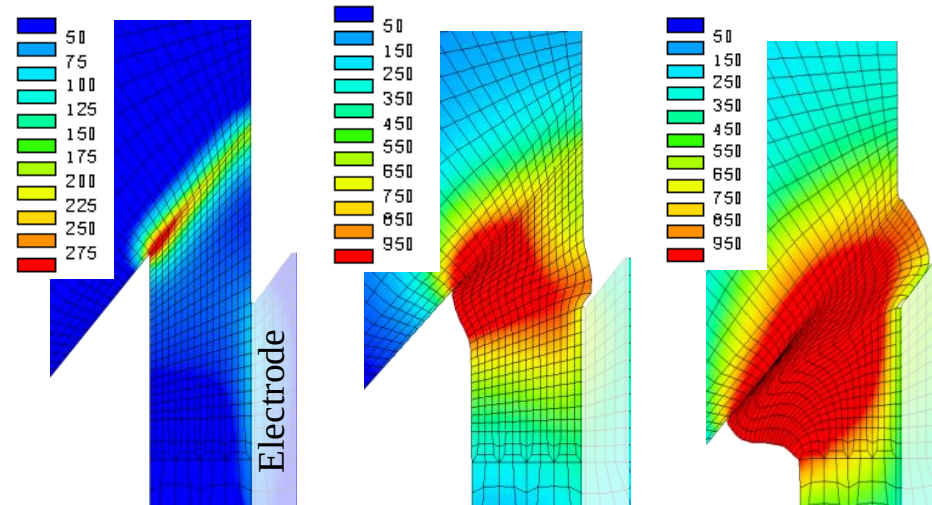
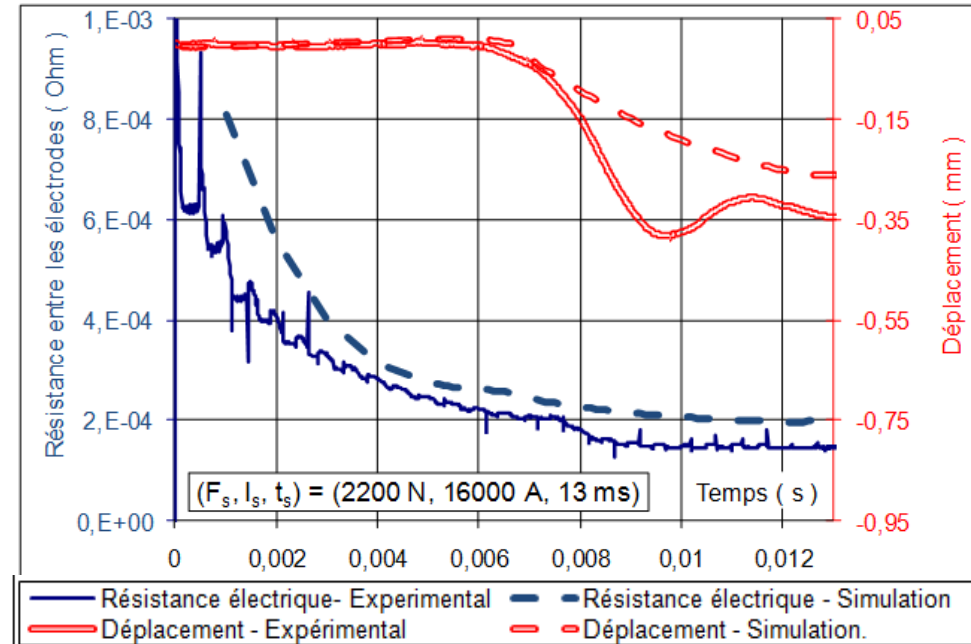


energie atomique • énergies alternatives



- L'étape de soudage se déroule en 3 temps :
 - Chauffage de l'interface
 - Chauffage de la partie de gaine dépassant de l'électrode
 - Affaissement de la gaine
- La simulation numérique est représentative de ces phénomènes thermiques et mécaniques

- Les hypothèses mécaniques réalisées limitent la capacité de la simulation dans la représentation de la déformée



Méthodologie générale de l'étude



énergie atomique • énergies alternatives



Paramètres opératoires

Contrôlent



Phénomènes physiques

Simulation numérique

La simulation rend-elle bien
compte des phénomènes
physiques ?

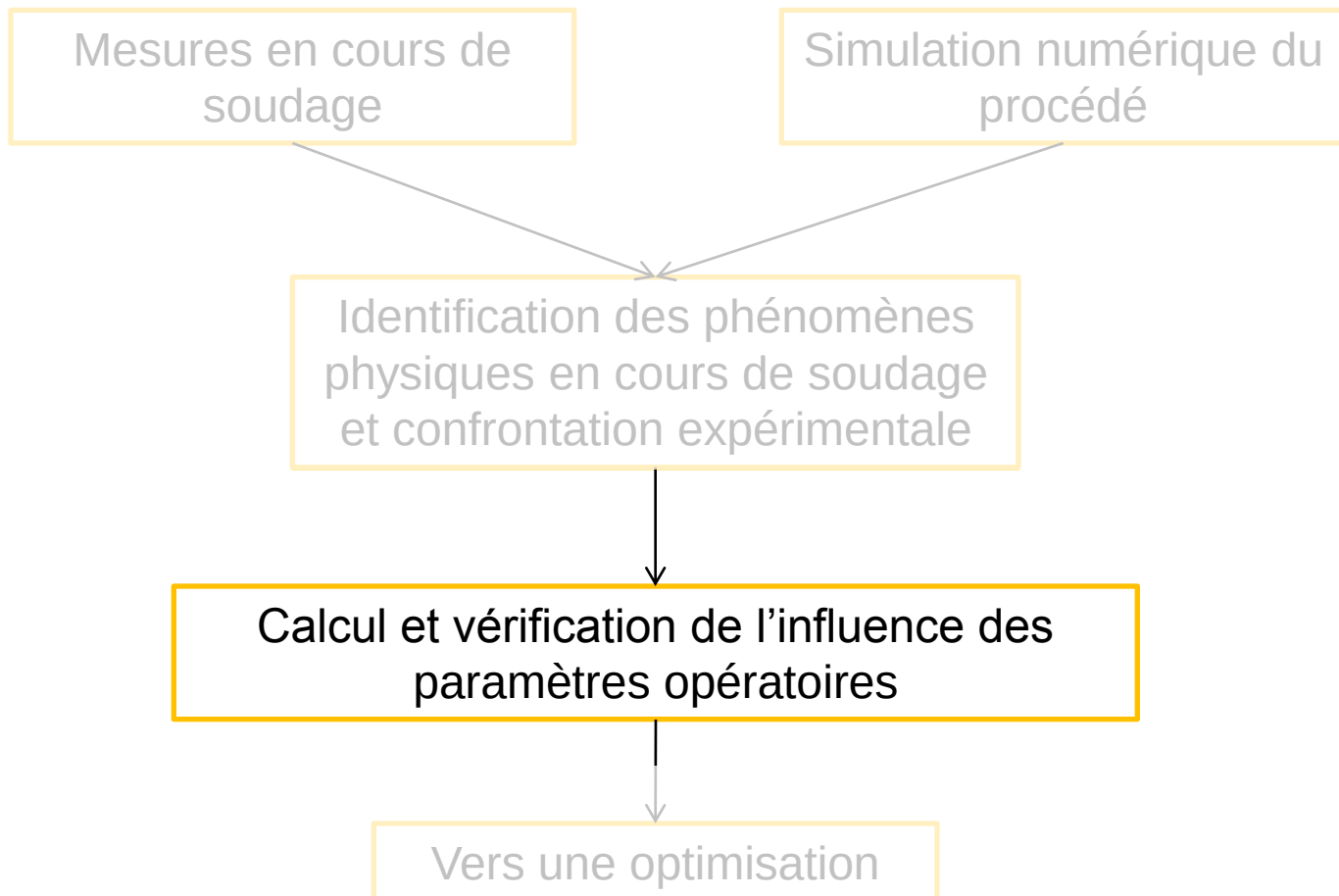
Puis-je utiliser la
simulation pour
optimiser le procédé et
éviter la ruine de la
structure ?



Plan



énergie atomique • énergies alternatives



Influences des paramètres opératoires



énergie atomique • énergies alternatives



- Méthode des plans d'expériences factoriels complets
 - 4 facteurs (F_s , I_s , t_s , L_g) à 2 niveaux → 16 essais

	Facteur	Niveau -1	Niveau 1
F_s	Force	1800 N	2200 N
I_s	Intensité du courant	14 kA	18 kA
t	Temps de soudage	10 ms	15 ms
L_g	Longueur de gaine dépassant de l'électrode	0.2 mm	0.8 mm

Bornes du plan d'expériences

Ref.	F_s	I_s	t_s	L_g
1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	+1
3	-1	-1	+1	-1
4	-1	-1	+1	+1
5	-1	+1	-1	-1
	...	...	...	...
16	+1	+1	+1	+1

Matrice d'essais du plan d'expériences

Influences des paramètres opératoires



énergie atomique • énergies alternatives



- Méthode des plans d'expériences factoriels complets
 - 3 réponses étudiées

- R_{init} : Résistance électrique à $t = 5$ ms

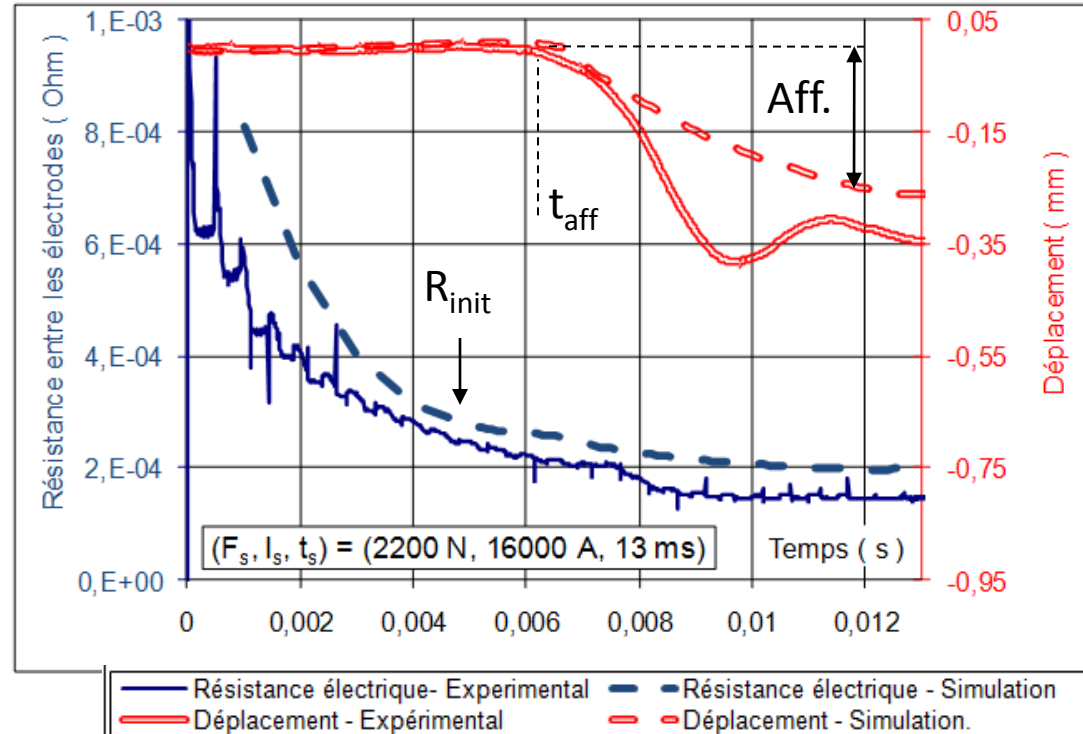
→ Représentative du phénomène de chauffage de l'interface

- t_{aff} : Temps de début d'affaissement

→ Représentatif du phénomène de chauffage des volumes

- Aff : Affaissement final

→ Représentatif du phénomène de déformation de la gaine



Réalisation d'un plan d'expériences numérique et d'un plan d'expériences expérimental

Influences des paramètres opératoires



energie atomique • énergies alternatives



- Comparaison de l'influence obtenue par méthode numérique et de l'influence obtenue par méthode expérimentale

	Résultats expérimentaux			Résultats numériques		
Facteurs	R_{init} ($\mu\Omega$ m)	t_{aff} (ms)	Aff (μ m)	R_{init} ($\mu\Omega$ m)	t_{aff} (ms)	Aff (μ m)
Constante	233	7,13	379	236	7,62	257
F_s	- 4	-0,07	- 20	- 1	-0,24	24
I_s	-17	-0,80	102	-11	-1,09	79
t	- 2	-0,10	35	0	0,03	68
L_g	22	-0,77	161	23	-1,09	153
Contribution interaction + résidus	2 %	21 % dont $I_s * L_g = \uparrow 13$ %	4 %	0 %	5 % dont $I_s * L_g = \uparrow 4$ %	4 %

Effet des paramètres opératoires

*Rappel : Réponse = Constante + [Effet du facteur 1 * niveau du facteur 1] + [Effet du facteur 2 * niveau du facteur 2] + ...*

Exemple : $R_{init} = 233 - 4 \text{ niveau } (F_s) - 17 \text{ niveau } (I_s) - 2 \text{ niv}(t_s) + 22 \text{ niv}(L_g)$

Influences des paramètres opératoires



énergie atomique • énergies alternatives



- Comparaison de l'influence obtenue par méthode numérique et de l'influence obtenue par méthode expérimentale

	Résultats expérimentaux			Résultats numériques		
Facteurs	R_{init} ($\mu\Omega$)	t_{aff} (ms)	Aff (μm)	R_{init} ($\mu\Omega$)	t_{aff} (ms)	Aff (μm)
Constante	233	7,13	379	236	7,62	257
F_s	- 4	-0,07	- 20	- 1	-0,24	24
I_s	-17	-0,80	102	-11	-1,09	79
t	- 2	-0,10	35	0	0,03	68
L_g	22	-0,77	161	23	-1,09	153
Contribution interaction + résidus	2 %	21 % dont $I_s * L_g = \uparrow 13 \%$	4 %	0 %	5 % dont $I_s * L_g = \uparrow 4 \%$	4 %

- Chauffage des interfaces représenté par R_{init}
 Bonne représentation de la valeur moyenne
 Bonne représentation de l'influence des paramètres opératoires

Influences des paramètres opératoires



énergie atomique • énergies alternatives



- Comparaison de l'influence obtenue par méthode numérique et de l'influence obtenue par méthode expérimentale

	Résultats expérimentaux			Résultats numériques		
Facteurs	R_{init} (μOhm)	t_{aff} (ms)	Aff (μm)	R_{init} (μOhm)	t_{aff} (ms)	Aff (μm)
Constante	233	7,13	379	236	7,62	257
F_s	- 4	-0,07	- 20	- 1	-0,24	24
I_s	-17	-0,80	102	-11	-1,09	79
t	- 2	-0,10	35	0	0,03	68
L_g	22	-0,77	161	23	-1,09	153
Contribution interaction + résidus	2 %	21 % dont $I_s * L_g = \uparrow 13 \%$	4 %	0 %	5 % dont $I_s * L_g = \uparrow 4 \%$	4 %

- Chauffage des volumes représenté par t_{aff}
 Bonne représentation de la valeur moyenne
 Bonne représentation de l'influence des paramètres opératoires

Influences des paramètres opératoires



énergie atomique • énergies alternatives



- Comparaison de l'influence obtenue par méthode numérique et de l'influence obtenue par méthode expérimentale

	Résultats expérimentaux			Résultats numériques		
Facteurs	R_{init} ($\mu\Omega$)	t_{aff} (ms)	Aff (μm)	R_{init} ($\mu\Omega$)	t_{aff} (ms)	Aff (μm)
Constante	233	7,13	379	236	7,62	257
F_s	- 4	-0,07	- 20	- 1	-0,24	24
I_s	-17	-0,80	102	-11	-1,09	79
t	- 2	-0,10	35	0	0,03	68
L_g	22	-0,77	161	23	-1,09	153
Contribution interaction + résidus	2 %	21 % dont $I_s * L_g = \uparrow 13 \%$	4 %	0 %	5 % dont $I_s * L_g = \uparrow 4 \%$	4 %

- Déformation représentée par Aff

Sous estimation de l'affaissement par la simulation

Représentation correcte de l'influence des paramètres opératoires



La simulation représente les effets des paramètres opératoires sur l'ensemble de la plage de soudabilité

Méthodologie générale de l'étude



énergie atomique • énergies alternatives



Paramètres opératoires

Contrôlent



Phénomènes physiques

Simulation numérique

La simulation rend-elle bien
compte des phénomènes
physiques ?



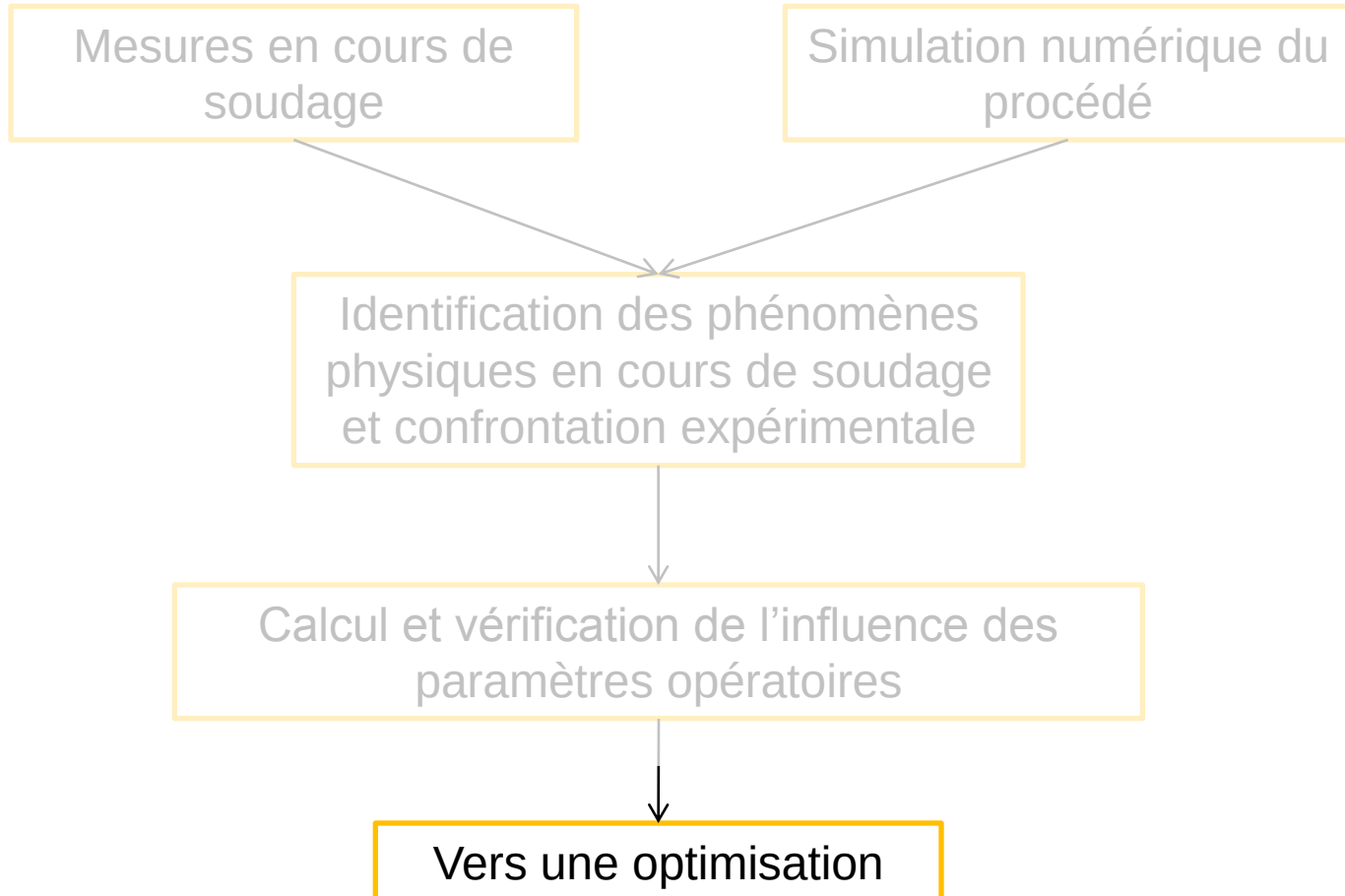
Puis-je utiliser la
simulation pour
optimiser le procédé et
éviter la ruine de la
structure ?



Plan



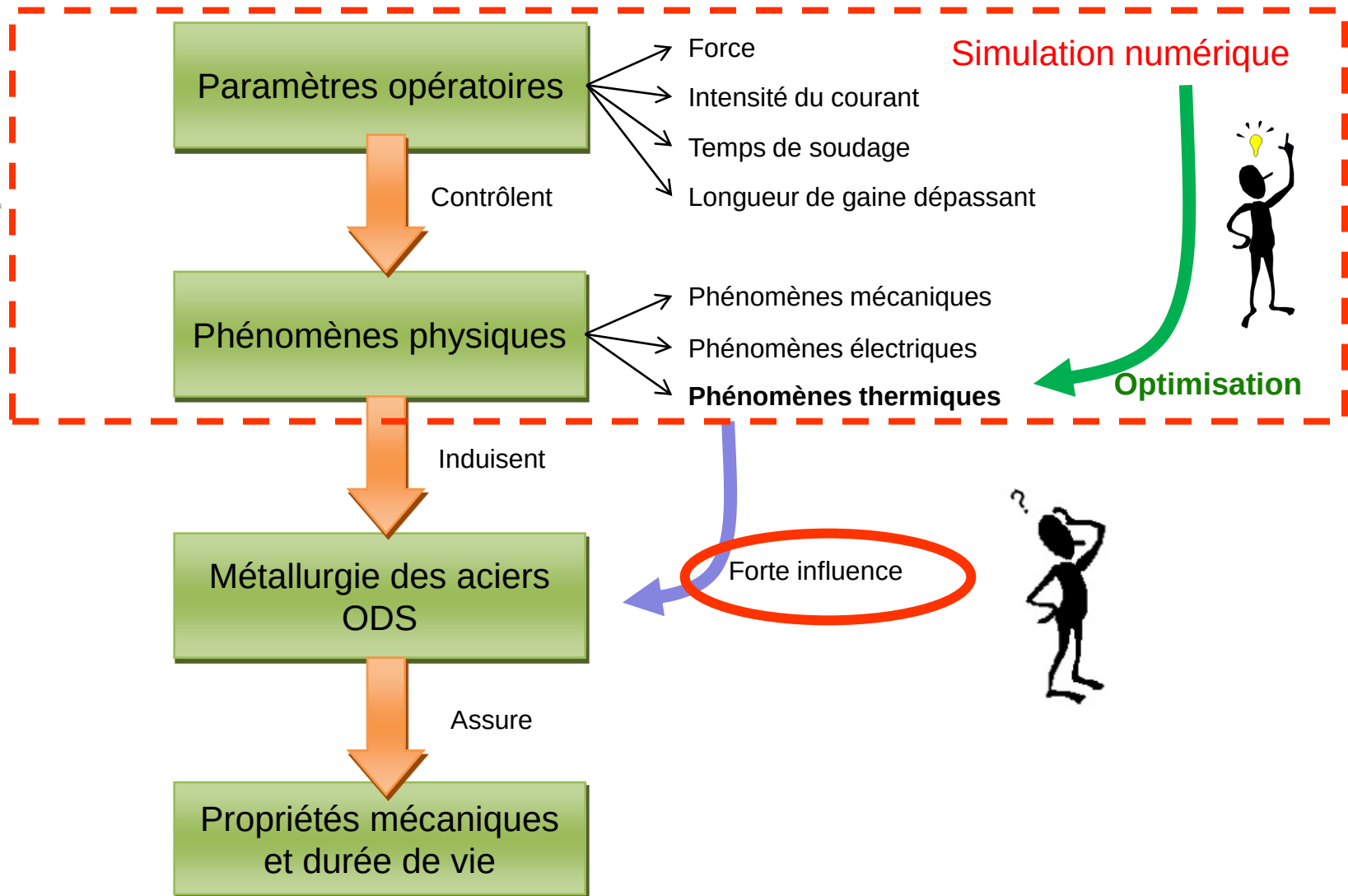
énergie atomique • énergies alternatives



Conclusions et perspectives



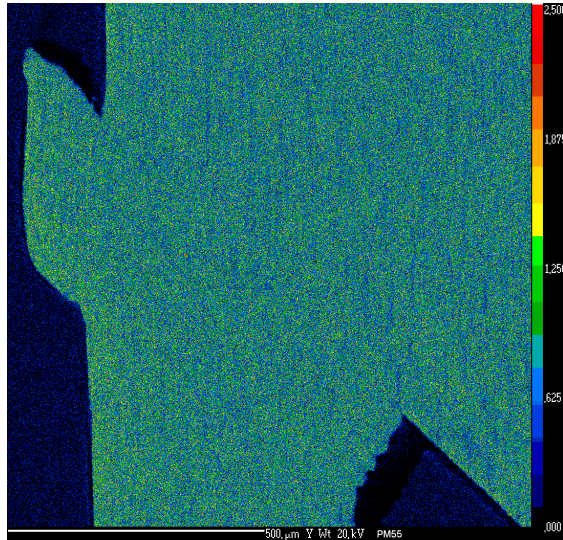
énergie atomique • énergies alternatives



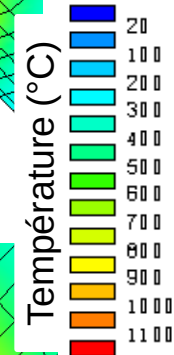
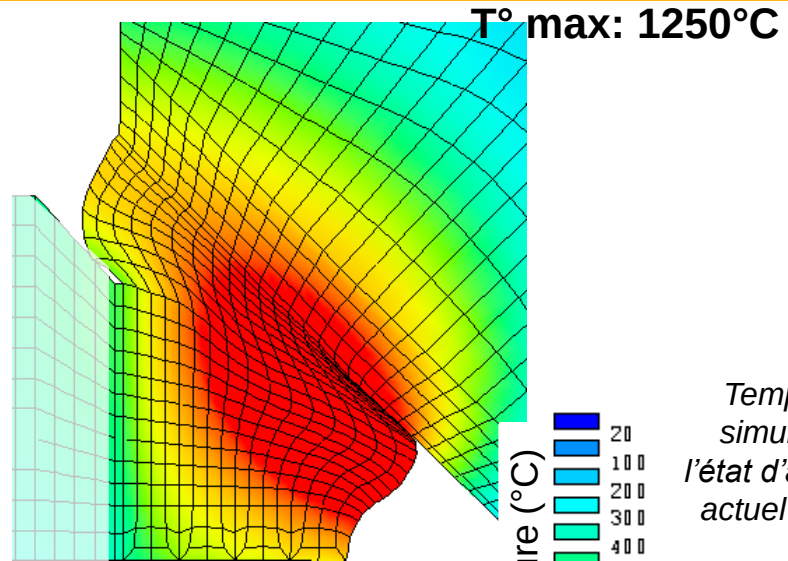
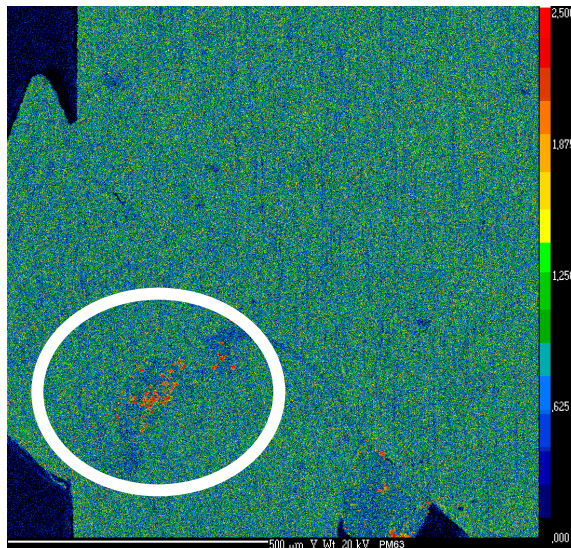
Quels critères pour optimiser?



energie atomique • energies alternatives

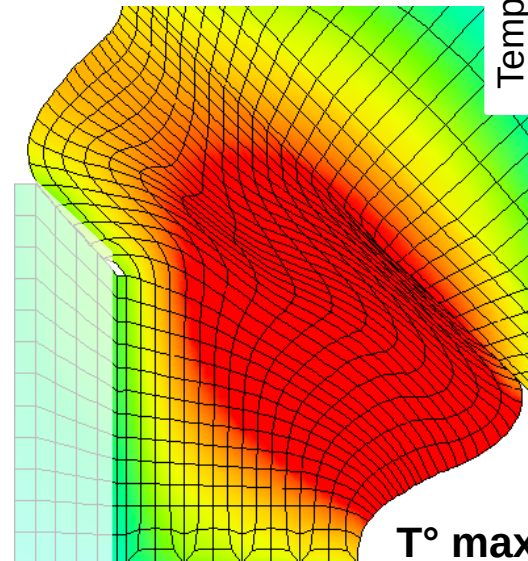


Cartographie de la dispersion d'Yttrium (renfort)



Températures
simulées dans
l'état d'avancement
actuel du modèle

(Hypothèses des
contacts mécaniques
en cours de discussion)



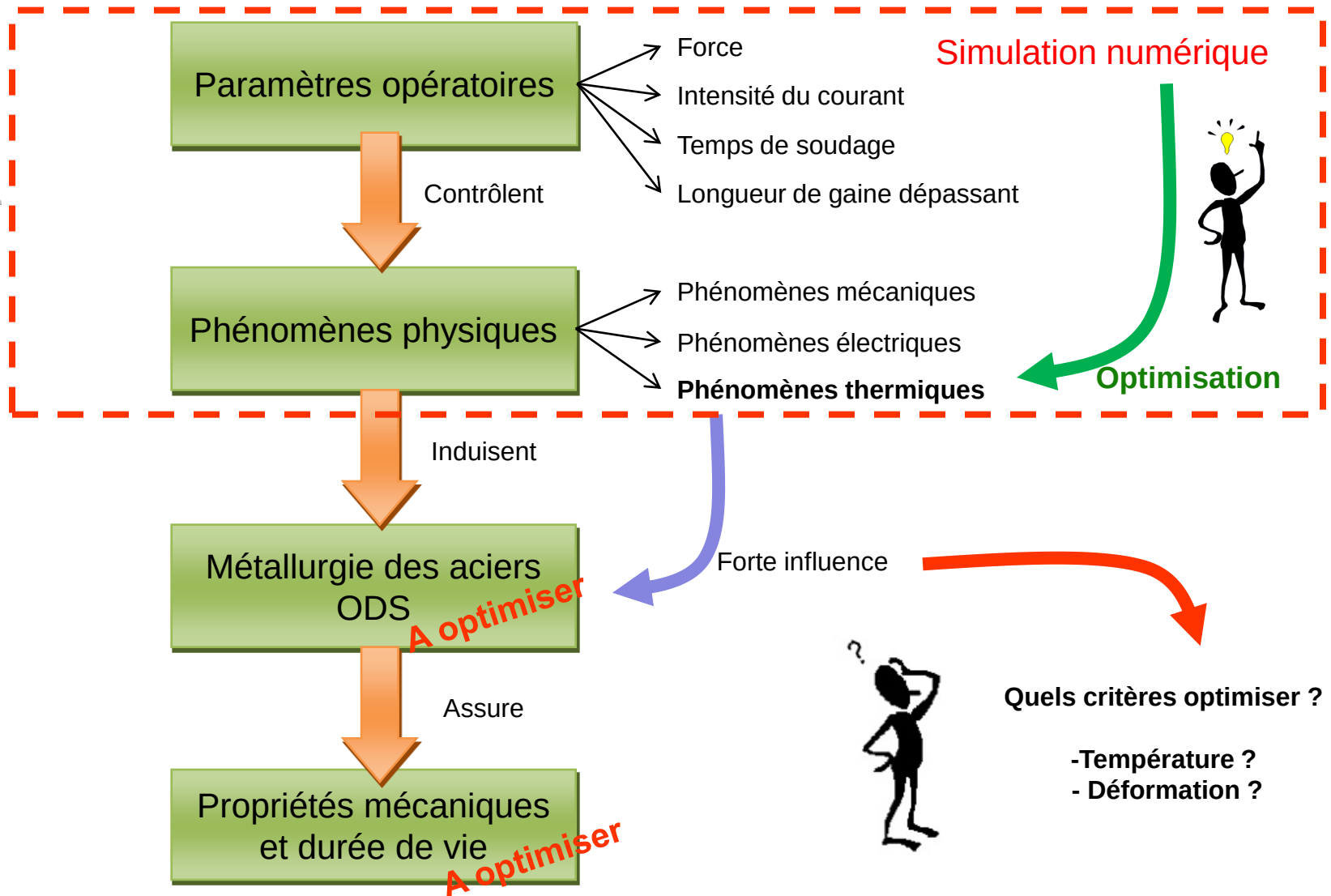
T° max: 1350°C

Modification
de la
dispersion
d'oxyde
pouvant
causer la
ruine de la
structure
soudée

Conclusions et perspectives



energie atomique • énergies alternatives





énergie atomique • énergies alternatives



Merci de votre attention

Fabien CORPACE
3^{ème} année de doctorat
fabien.corpace@gmail.com