

DÉVELOPPEMENT D'UN ENVIRONNEMENT DE SIMULATION DE CAPTEURS MAGNÉTIQUES SPATIAUX : PLASMAG



Café Spatial - 05/07

Responsable: Malik MANSOUR
Co-encadrant: Claire REVILLET
Enseignant:

Maxime RONCERAY



SORBONNE
UNIVERSITÉ

université
PARIS-SACLAY



- ① Introduction
- ② Cadre du Stage
 - Contexte
 - Présentation de PO
 - Introduction au SCM
- ③ Description de la Mission du Stage
 - Présentation du besoin
 - Sujet du Stage
 - Contraintes Associées
 - Environnement de Travail
- ④ Conception et Développement du Système
 - Études préliminaires
 - PLASMAG
 - Architecture logicielle
 - Design de l'application
- ⑤ Conception du moteur
 - Problématique
 - Solution proposé
- ⑥ Améliorations
- ⑦ SPICE
 - Simulation numérique
 - Résultats
- ⑧ Optimisation
 - Pourquoi et Comment Optimiser
 - Fonctions de Coût
- ⑨ Bilans
 - Bilan Technique

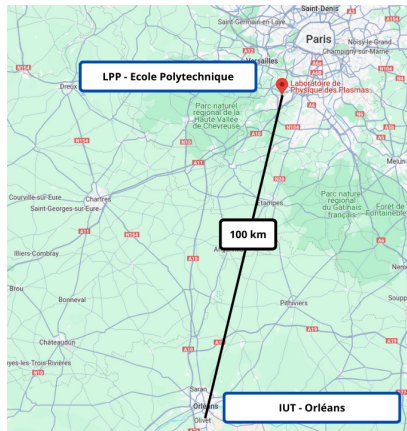
2 – CADRE DU STAGE

Contexte
Présentation de PO
Introduction au SCM



CONTEXTE

- Stage de 3e année de BUT au LPP
- Collaboration avec le LPC2E
(Laboratoire de Physique et Chimie de
l'Environnement et de l'Espace



PLASMA OBSERVATORY

Étude multi-points des particules chargées (Plasmas) autours de la Terre.



- 7 satellites (un satellite mère et 6 satellites filles)
- Chaque satellite porte une charge utile
- Stage réalisé dans le cadre de la mission

PO

LPP – Développement d'un environnement de simulation de capteurs magnétiques spatiaux – PLASMA-MAG – Maxime RONGERAY [4] 5 / 37

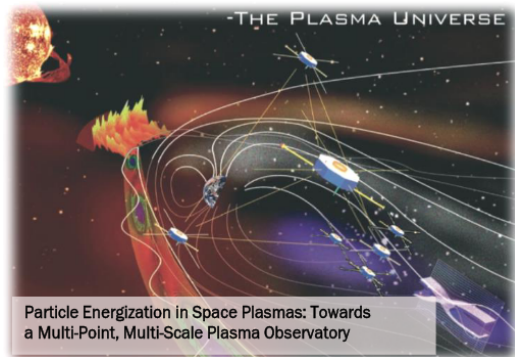


Figure – Aperçu de la mission PO [4]

Définition d'un capteur

Dispositif qui détecte une valeur physique (mouvement, température ...) de l'environnement et la convertit en un signal lisible ou transmissible pour traitement.

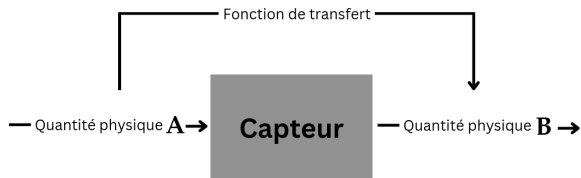


Figure – Schéma d'un capteur

INTRODUCTION AU SCM

Définition d'un capteur

Dispositif qui détecte une valeur physique (mouvement, température ...) de l'environnement et la convertit en un signal lisible ou transmissible pour traitement.

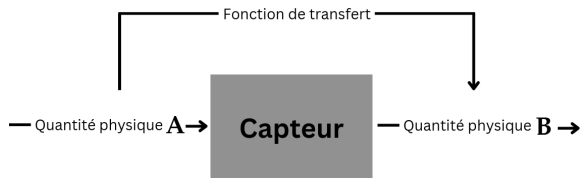


Figure – Schéma d'un capteur

Search-coil magnetometer (SCM)

Capteur magnétique Inductif

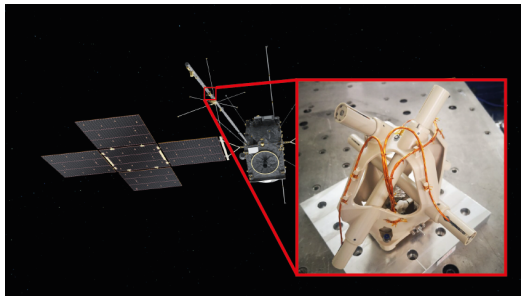


Figure – Capteur SCM de JUICE [1]

Définition d'un capteur

Dispositif qui détecte une valeur physique (mouvement, température ...) de l'environnement et la convertit en un signal lisible ou transmissible pour traitement.

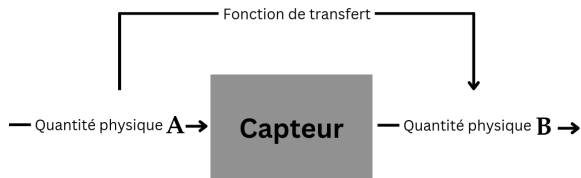


Figure – Schéma d'un capteur

Search-coil magnetometer (SCM)

Capteur magnétique Inductif

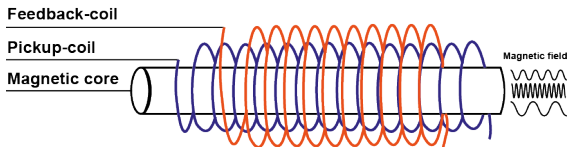


Figure – Schéma d'une antenne [1]

3 – DESCRIPTION DE LA MISSION DU STAGE

Présentation du besoin
Sujet du Stage
Contraintes Associées
Environnement de Travail



Modéliser

Créer une représentation mathématique permettant de prédire et analyser le comportement d'un capteur

Modélisation

- Analytique
- Numérique

Modéliser

Créer une représentation mathématique permettant de prédire et analyser le comportement d'un capteur

Modélisation

- Analytique
- Numérique

Utiliser le modèle

On souhaite : Comprendre les propriétés du capteur

- propriétés magnétiques (tension induite)
- propriétés électriques (RLC, U,I, Impédence)
- performance (NEMI ^a)

a. Noise Equivalent Magnetic Induction

Intitulé

Développement d'un environnement de simulation de capteurs magnétiques spatiaux

→ doit pouvoir être réutilisable pour d'autres types de capteurs et projets.

Objectif : Créer un moteur de calcul modulaire et une interface graphique, amorçant le développement un logiciel pérenne.

Temporelles

16 semaines de stages

Qualitatives

- Code bien documenté
- Qualité professionnelle
- Code bien construit et modulaire

Temporelles

16 semaines de stages

Qualitatives

- Code bien documenté
- Qualité professionnelle
- Code bien construit et modulaire

Quantitatives

Besoin de *produire* quelque chose

Suivi d'un cahier des charges :

- Déployable sur Windows, Linux(Fedora), Mac
- Simulation de divers paramètres du capteur
- Modularité de l'application et du modèle
- Interface graphique
- Calcul en temps-réel
- Interfaçage avec des librairies métiers

- Ordinateur sous Fedora (Linux)
- Installation du système personnalisée
- Supervisé par M.Mansour¹ et C.Revillet², en collaboration avec D.Alison¹ et G.Jannet¹

-
- a.* Électroniciens
 - b.* Informaticienne

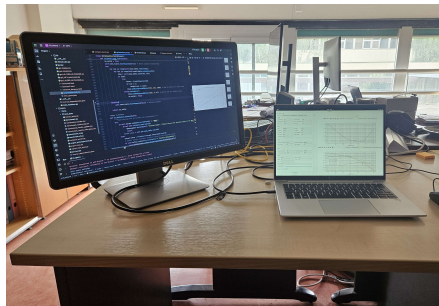


Figure – Poste de travail

- Fichier de spécifications techniques
- Retour permanent sur l'évolution du logiciel
- Versionnement
 - Forge OSUC - Redmine (Git)
 - Commits quotidiens
 - Releases sur le GitHub public du LPP
- Qualité du code
 - Pylint
 - Normes propres au projet

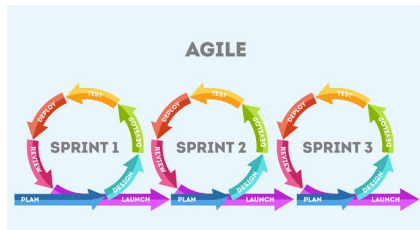


Figure – Méthode de travail AGILE

- Documentations (Anglais)

4 – CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME

Études préliminaires
PLASMAG
Architecture logicielle
Design de l'application



Études

technologiques et du code *legacy*

- Code existant sous forme d'un Jupyter notebook
- Choix des librairies :
 - **Interface Utilisateur** : Pyqt5, Pyqt6, tkinter ...
 - **Scientifiques** : Numpy, Pandas, XArray ..
 - **Graphique** : Matplotlib

Études

technologiques et du code *legacy*

- Code existant sous forme d'un Jupyter notebook
- Choix des librairies :
 - **Interface Utilisateur** : Pyqt5, Pyqt6, tkinter ...
 - **Scientifiques** : Numpy, Pandas, XArray ..
 - **Graphique** : Matplotlib

Étude de l'existant



Figure – Pyxel 1.0 : an open-source Python framework for detector and end-to-end instrument simulation

- Logiciel différent
- Architecture intéressante
- Pipeline de traitement

NOM DE L'APPLICATION

CONCEPTION ET
DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME

PASMA G

*Python ibrary for Accurate
Search-coil Magnetometer Adjustments with GUI*

Figure – PLASMAG logo

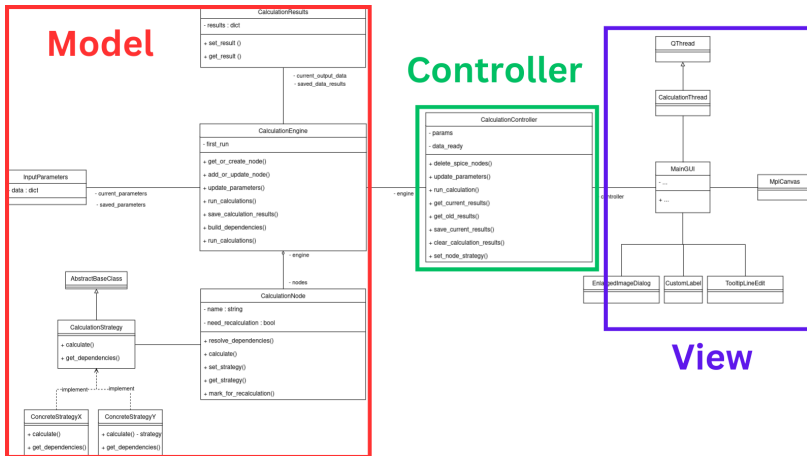


Figure – Diagramme de classes

DESIGN DE L'APPLICATION

Prototypes graphique

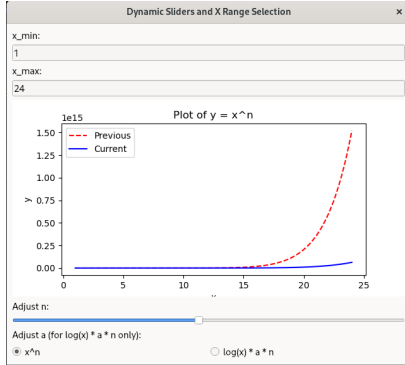


Figure – Test plot en temps réel et sliders

DESIGN DE L'APPLICATION

Prototypes graphique

CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME

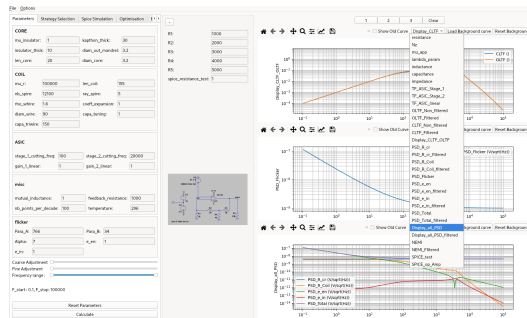
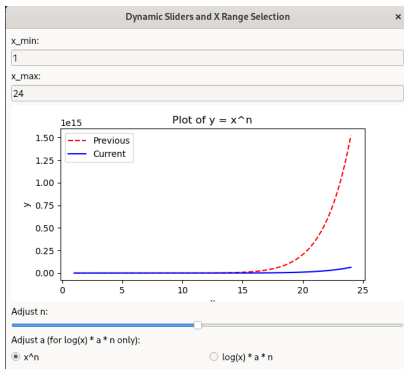


Figure – Première version de l'UI

Figure – Test plot en temps réel et sliders

5 – CONCEPTION DU MOTEUR

Problématique
Solution proposé



Le modèle n'est pas fixe

- Une valeur physique peut être obtenue de plusieurs façons
 - analytiquement
 - numériquement
 - depuis des mesures
- Chacune de ces méthodes peut être amenée à changer et proposer plusieurs versions en parallèle

Le modèle n'est pas fixe

- Une valeur physique peut être obtenue de plusieurs façons
 - analytiquement
 - numériquement
 - depuis des mesures
- Chacune de ces méthodes peut être amenée à changer et proposer plusieurs versions en parallèle

Comment faire pour avoir un moteur de simulation modulaire ?

Solution

Représentation du processus de calcul sous forme d'un arbre

Chaque paramètre (R,L,C,Z,longueur ...)
représente un noeud de l'arbre

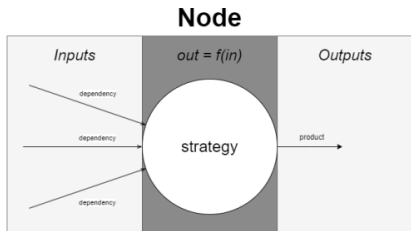


Figure – Représentation d'un noeud

Représentation du processus de calcul sous forme d'un arbre

Chaque paramètre (R,L,C,Z,longueur ...) représente un noeud de l'arbre

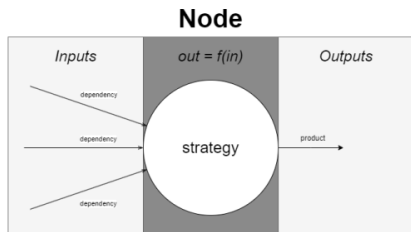


Figure – Représentation d'un noeud

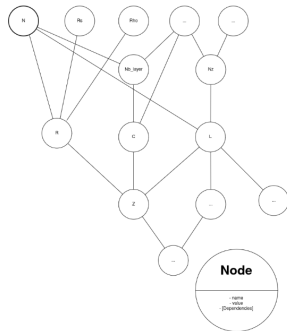


Figure – Arbre de calcul

Utilisation du patron STRATÉGIE

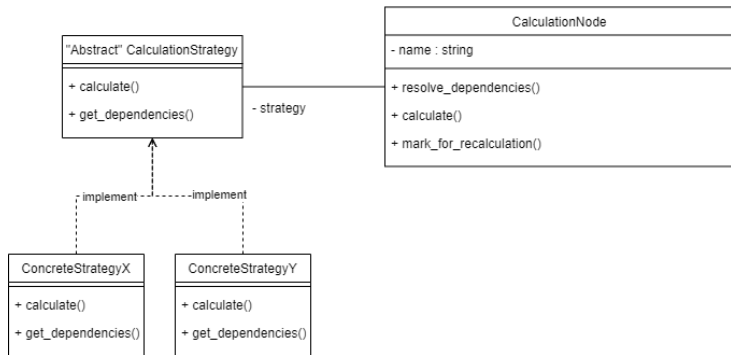


Figure – Diagramme de classe

- Utilisation de la programmation-objet pour créer une interface
- Chaque stratégie implémente l'interface^a
- La stratégie souhaitée est affectée au noeud

^a. Avec la librairie python ABC :
classes abstraites ↔ *interfaces*

Avantages

- Modulaire
- Changement de méthode de calcul simple

Inconvénients

- Potentielles dépendances cycliques
- Coûts de calculs ?

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

Avantages

- Modulaire
- Changement de méthode de calcul simple

Inconvénients

- Potentielles dépendances cycliques
- Coûts de calculs ?

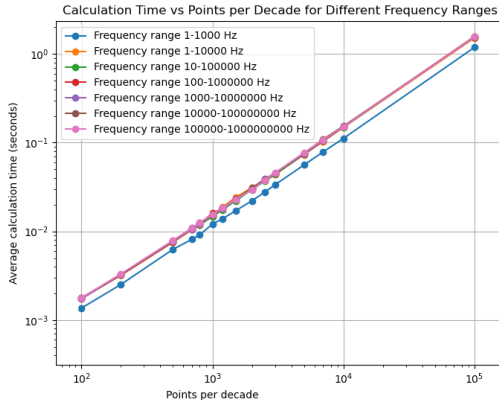
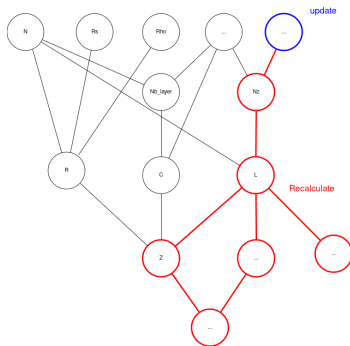


Figure – Premier benchmark

AMÉLIORATION DU MOTEUR

Idée générale

Ne recalculer QUE les nodes nécessaires



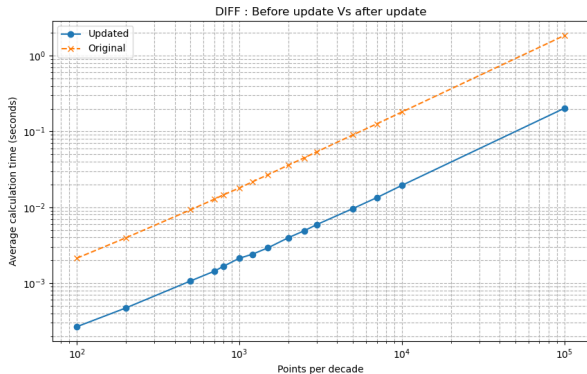


Figure – Benchmark après modifications

7 – SPICE

Simulation numérique
Résultats



Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis

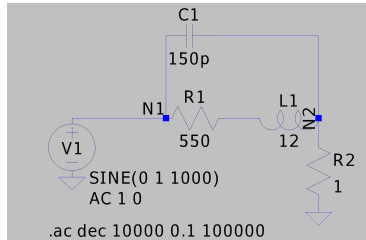


Figure – Circuit RLC

Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis

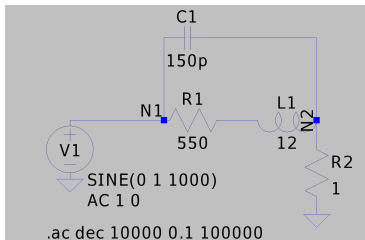


Figure – Circuit RLC

```
V1 N1 0 SINE(0 1 1000) AC 1 0
R1 N001 N1 550
C1 N2 N1 150p
L1 N2 N001 12
R2 N2 0 1
.ac dec 10000 0.1 100000
.backanno
.end
```

Figure – Netlist RLC

Problème des netlist

- Complicé à parser
- Difficilement lisible

Problème des netlist

- Compliqué à parser
- Difficilement lisible

Solution

Utilisation de PySpice [6]

- Librairie Python
- Interface Python - Netlist - SPICE

Problème des netlist

- Complicé à parser
- Difficilement lisible

Solution

Utilisation de PySpice [6]

- Librairie Python
- Interface Python - Netlist - SPICE

```
circuit = Circuit(' Imp JUICE')

circuit.SinusoidalVoltageSource('V1', 'N1', circuit.gnd, amplitude=1 @ u_V, frequency=1 @u_kHz)

circuit.R('1', 'N001', 'N1', resistance @u_ohm)
circuit.C('1', 'N2', 'N1', capacitance @u_Farrad)
circuit.L('1', 'N2', 'N001', inductance @u_Henry)
circuit.R('2', 'N2', circuit.gnd, 1 @u_kohm)
```

Figure – Implémentation PySpice du circuit RLC

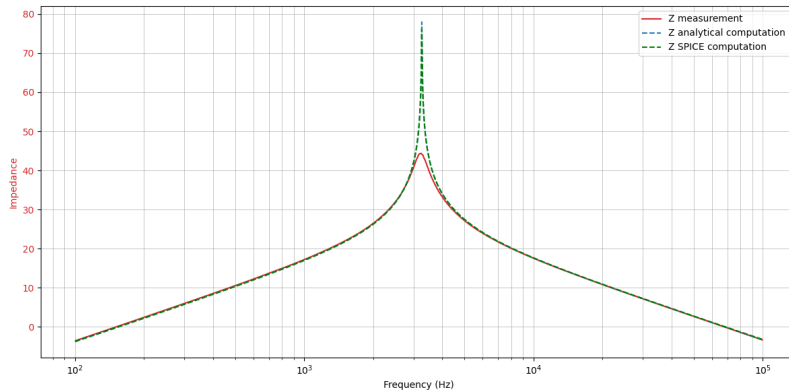


Figure – Résultats de simulation comparaison entre : JUICE - SPICE - Analytique

8 – OPTIMISATION

Pourquoi et Comment Optimiser
Fonctions de Coût



Optimisation

Processus d'ajustement des paramètres du capteur, afin de trouver la meilleure solution pour répondre à un critère.

Critères :

- Performance (NEMI)
- Taille / Poids ...

Objectif

Travail de *dégrossissement* pour proposer un pré-design de capteur

Optimisation

Processus d'ajustement des paramètres du capteur, afin de trouver la meilleure solution pour répondre à un critère.

Critères :

- Performance (NEMI)
- Taille / Poids ...

Objectif

Travail de *dégrossissement* pour proposer un pré-design de capteur

Via plusieurs algorithmes :

- Algorithme génétique
- optimisation par essais particuliers
- Recuit simulé

Définition

Formule mathématique utilisée pour exprimer la différence entre les solutions proposées par le modèle et les valeurs cibles, afin de trouver la solution optimale.

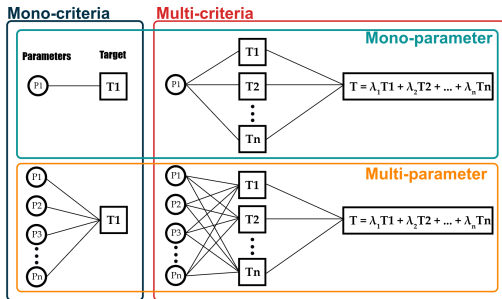
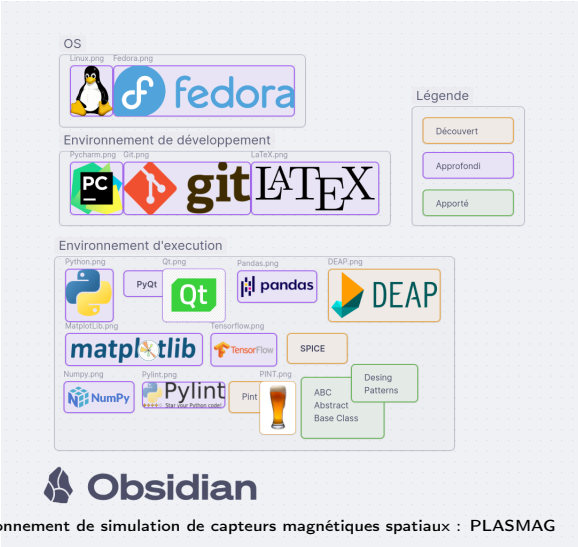


Figure – Différents cas d'optimisation

9 – BILANS

Bilan Technique





Ce que j'ai apporté :

- Développement d'une Interface Utilisateur
- Création d'un moteur de calcul modulaire
- Intégration de SPICE
- Documentation utilisateur et contributeur
- Mise a disposition du code à la communauté
- Communication interne de l'outil

Ce que j'ai acquis :

- Nouvelles connaissances scientifiques
 - Physique
 - Électronique

Ce qu'il reste à faire

- Poursuivre le développement de PLASMAG en enrichissant les fonctionnalités et les modèles disponibles.
- Utilisation de PLASMAG dans la phase de définition de la mission Plasma Observatory (et des futures missions du LPP et du LPC2E).
- Faire connaître PLASMAG à la communauté instrumentale.



"Juice SCM", https://x.com/ESA_JUICE/status/1297774546477633540



A. P. Engelbrecht, Computational Intelligence. John Wiley & Sons, 2007.



"Pint : makes units easy — pint 0.23rc3.dev1+g52ac9f5 documentation," [pint.readthedocs.io](https://pint.readthedocs.io/en/stable/).
<https://pint.readthedocs.io/en/stable/>



A. Retino, "Particle Energization in Space Plasmas : Towards a Multi-Point, Multi-Scale Plasma Observatory," Oct. 29, 2019. https://www.cosmos.esa.int/documents/3273648/3495481/2_03_ARetino-esa-voyage-workshop-2019.pdf/6073323d-2e45-c8d6-1851-b07e7e498406?t=1573466575654



"SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) | EECS at UC Berkeley," www2.eecs.berkeley.edu. <https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/1973/22871.html>



F. SALVAIRE, "PySpice," PySpice. <https://pyspice.fabrice-salvaire.fr/> (accessed Jun. 04, 2024).



"Ngspice, the open source Spice circuit simulator - Intro," ngspice.sourceforge.io.
<https://ngspice.sourceforge.io/>.



"DEAP documentation — DEAP 1.3.0 documentation," [Readthedocs.io](https://deap.readthedocs.io/en/master/), 2019.
<https://deap.readthedocs.io/en/master/>

Principe Physique

Converti la variation du flux magnétique en courant électrique

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

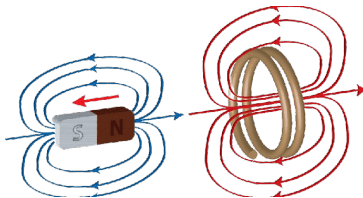


Figure – Loi de l'Induction

Composition du capteur

- Bobine principale
- Bobine de contre-réaction
- Noyau Magnétique

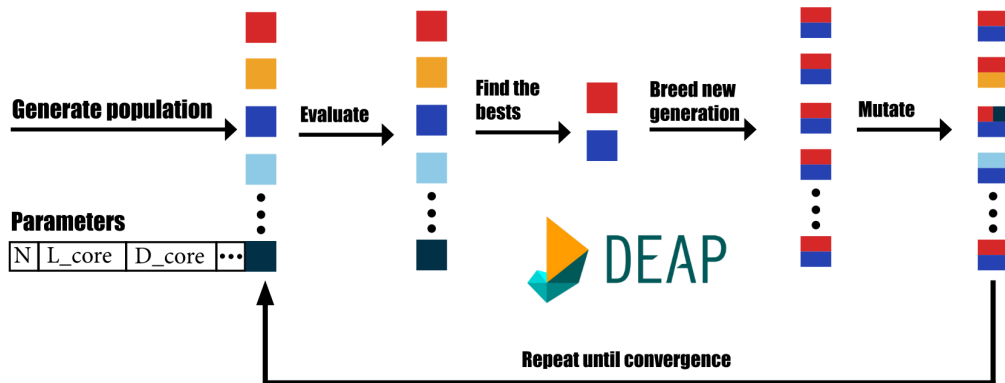
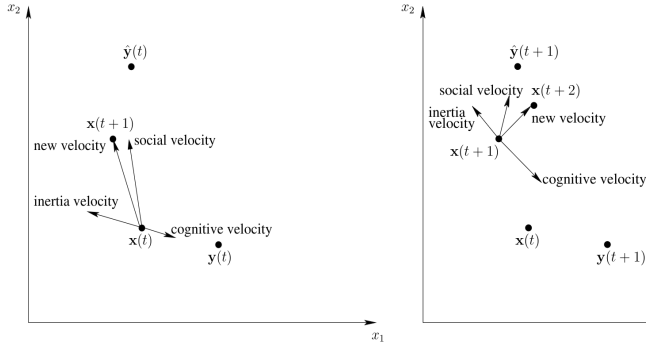


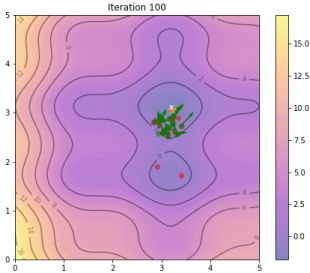
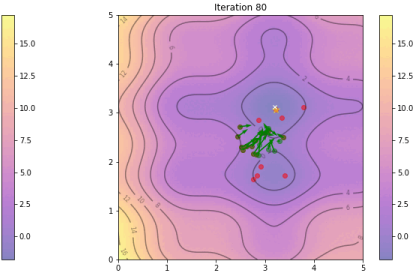
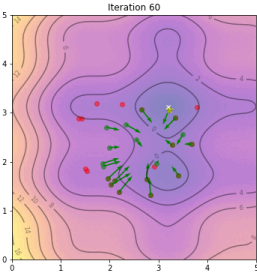
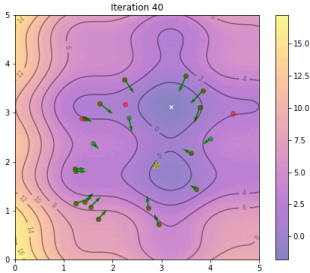
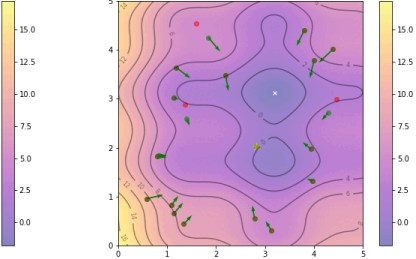
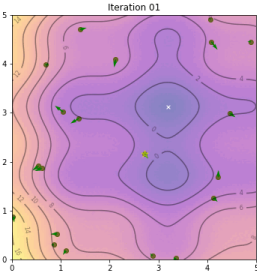
Figure – Algorithme génétique

Particle Swarm Optimisation

$$V_i(t+1) = \omega V_i(t) + c_1 r_1 (P_i - X_i) + c_2 r_2 (P_g - X_i) \quad (1)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (2)$$

(a) Time Step t (b) Time Step $t+1$



RECUIT SIMULÉ

$$P(e, e', T) = \exp\left(\frac{e' - e}{T}\right)$$

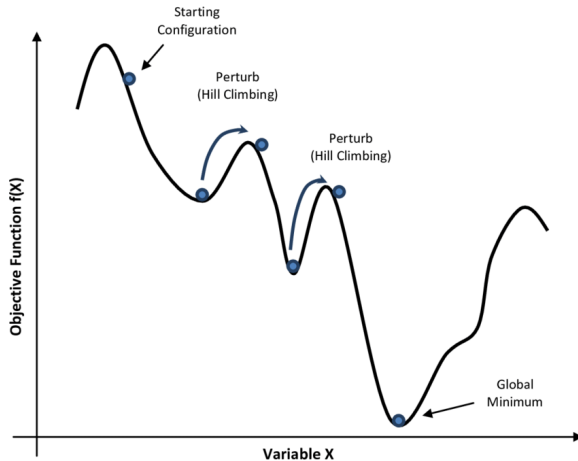


Figure – Recuit simulé

APPENDIX

