

C'est quoi la RO?

Karine Deschinkel
Professeure en Informatique
Enseignante-Chercheuse en Recherche Opérationnelle

PINT of SCIENCE 20 Mai 2025



Programme

C'est quoi la Recherche Opérationnelle ?

Domaines d'applications

Exemples de travaux en RO à FEMTO-ST

Conclusion et Perspectives

C'est quoi la Recherche Opérationnelle ?

Citation célèbre - De Gaulle - 1965

Des chercheurs qui cherchent, on en trouve ;
des chercheurs qui trouvent, on en cherche.

Traduction

Il serait temps de trouver des applications concrètes,
qui serviraient notamment aux entreprises et à la société

Opérationnelle ?

$$\begin{array}{r} 967 \\ + \quad 35 \\ \hline = \end{array}$$

Objectif :

$$\begin{aligned} \text{Min } F = & \sum_{i=1}^p \left(\sum_{j=1}^v \text{nb_read}(i,j) \sum_{k=1}^m T_{\text{read}}(i,k) * X_{kj} \right) \\ & + \sum_{i=1}^p \left(\sum_{j=1}^v \text{nb_write}(i,j) \sum_{k=1}^m T_{\text{write}}(i,k) * X_{kj} \right) \\ & + \sum_{k=1}^m (\text{CBM}_k * \text{TM}_k) + \sum_{k=1}^m (\text{CUM}_k * Y_k) \end{aligned}$$

Sous les contraintes:

$$\sum_{j=1}^v (\text{Taille_Var}(j) * X_{jk}) \leq \text{TM}_k \quad k = 1, \dots, m$$

$$\text{TM}_k \leq A * Y_k \quad k = 1, \dots, m \quad A \gg \gg 0$$

$$\sum_{k \in S_j} X_{kj} = 1 \quad j = 1, \dots, v$$

$$X_{jk} \in \{0,1\} \quad j = 1, \dots, v \quad \text{et} \quad k = 1, \dots, m$$

$$Y_k \in \{0,1\} \quad \text{et} \quad \text{TM}_k \in \mathbb{N} \quad k = 1, \dots, m$$

C'est quoi la Recherche Opérationnelle ?

- ▶ « La Recherche Opérationnelle est une discipline à la **frontière des mathématiques appliquées et de l'informatique**. L'objectif de la Recherche Opérationnelle est de trouver des solutions (recherche) à des (vrais) problèmes (opérationnels). Elle utilise des méthodes de résolution (algorithmes) permettant de construire des solutions sur des problèmes bien formulés (modèles) »¹

1. eurodecision.com
2. wikipedia

C'est quoi la Recherche Opérationnelle ?

- ▶ « La Recherche Opérationnelle est une discipline à la **frontière des mathématiques appliquées et de l'informatique**. L'objectif de la Recherche Opérationnelle est de trouver des solutions (recherche) à des (vrais) problèmes (opérationnels). Elle utilise des méthodes de résolution (algorithmes) permettant de construire des solutions sur des problèmes bien formulés (modèles) »¹
- ▶ « La recherche opérationnelle peut aider le décideur lorsque celui-ci est confronté à un problème **combinatoire, aléatoire ou concurrentiel** »²

1. eurodecision.com

2. wikipedia

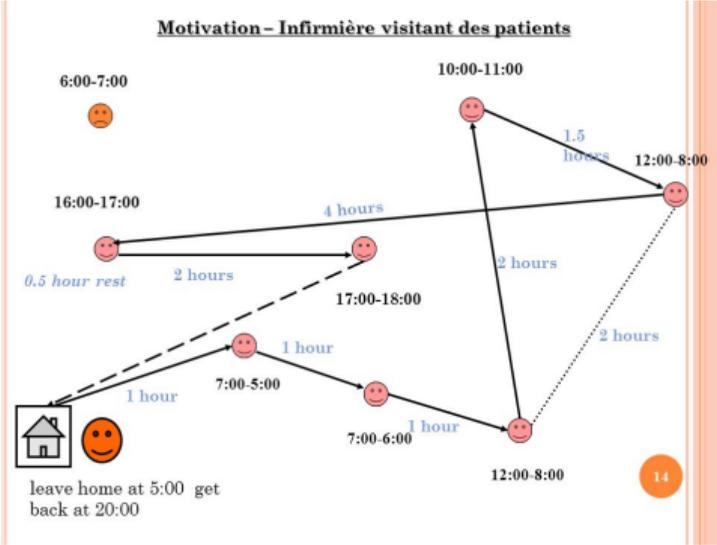
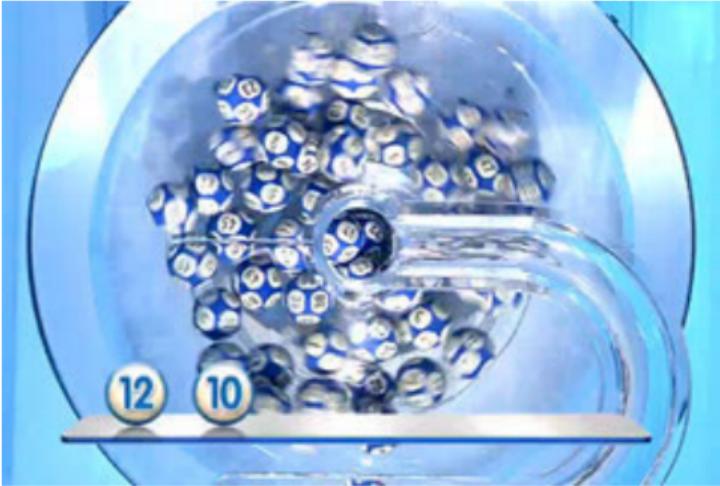
C'est quoi la Recherche Opérationnelle ?

- ▶ « La Recherche Opérationnelle est une discipline à la **frontière des mathématiques appliquées et de l'informatique**. L'objectif de la Recherche Opérationnelle est de trouver des solutions (recherche) à des (vrais) problèmes (opérationnels). Elle utilise des méthodes de résolution (algorithmes) permettant de construire des solutions sur des problèmes bien formulés (modèles) »¹
- ▶ « La recherche opérationnelle peut aider le décideur lorsque celui-ci est confronté à un problème **combinatoire, aléatoire ou concurrentiel** »²
- ▶ Cette discipline s'organise pendant la 2nde guerre mondiale et gagne le nom de **Recherche Opérationnelle**. Les problèmes traités concernent entre autre le placement d'antennes radar et la logistique des convois d'approvisionnement

1. eurodecision.com

2. wikipedia

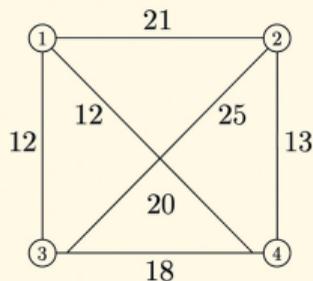
C'est quoi l'Optimisation Combinatoire ?



Exemple de problème d'optimisation combinatoire

Problème du voyageur de commerce

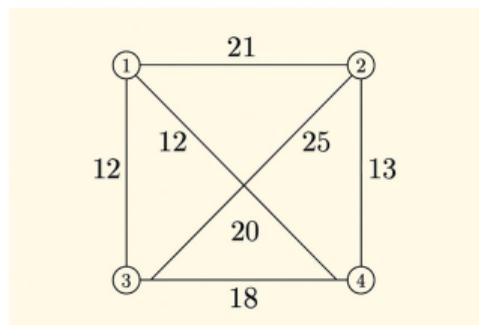
- 🚗 Visiter un ensemble de villes (modélisée par des sommets dans un graphe)
 - ▶ Dans quel ordre, si le but est de minimiser la distance parcourue ?
 - ▶ Toute permutation est une solution, quelle est la meilleure ?



Exemple de problème d'optimisation combinatoire

Problème du voyageur de commerce

- 🚗 Visiter un ensemble de villes (modélisée par des sommets dans un graphe)
 - ▶ Dans quel ordre, si le but est de minimiser la distance parcourue ?
 - ▶ Toute permutation est une solution, quelle est la meilleure ?
- ⚙️ avec 4 villes : (1,2,3,4,1) (1,3,2,4,1) (1,4,2,3,1) (1,4,3,2,1), ...



Exemple de problème d'optimisation combinatoire

Problème du voyageur de commerce

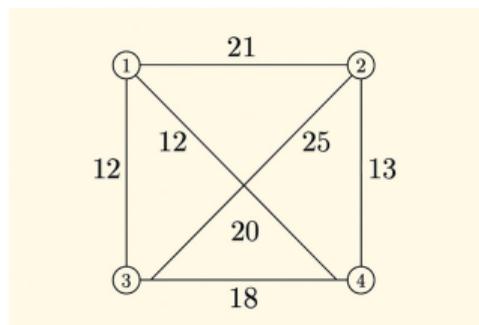
🚗 Visiter un ensemble de villes (modélisée par des sommets dans un graphe)

▶ Dans quel ordre, si le but est de minimiser la distance parcourue ?

▶ Toute permutation est une solution, quelle est la meilleure ?

⚙️ avec 4 villes : (1,2,3,4,1) (1,3,2,4,1) (1,4,2,3,1) (1,4,3,2,1), ...

➔ $n!/2$ solutions (ici $4!/2=4*3=12$)



Exemple de problème d'optimisation combinatoire

Problème du voyageur de commerce

🚗 Visiter un ensemble de villes (modélisée par des sommets dans un graphe)

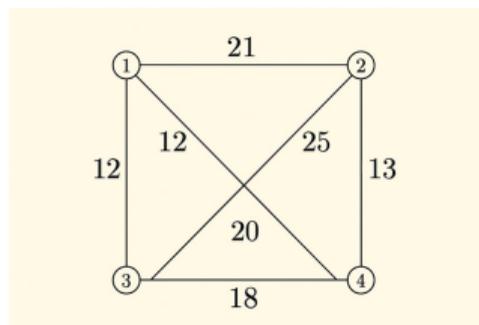
▶ Dans quel ordre, si le but est de minimiser la distance parcourue ?

▶ Toute permutation est une solution, quelle est la meilleure ?

⚙️ avec 4 villes : (1,2,3,4,1) (1,3,2,4,1) (1,4,2,3,1) (1,4,3,2,1), ...

➔ $n!/2$ solutions (ici $4!/2=4*3=12$)

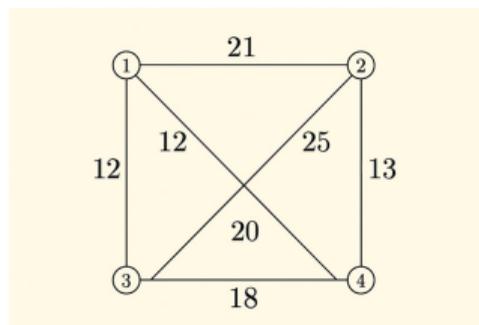
▶ Pour 60 villes, il y a **plus de solutions que d'atomes dans l'univers**



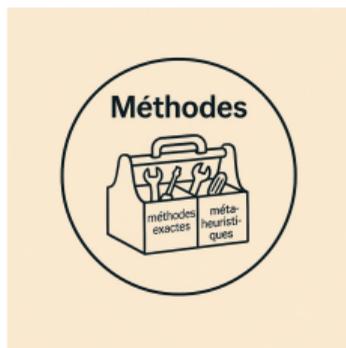
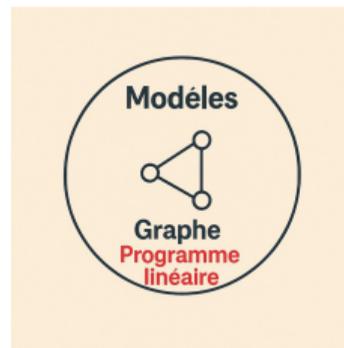
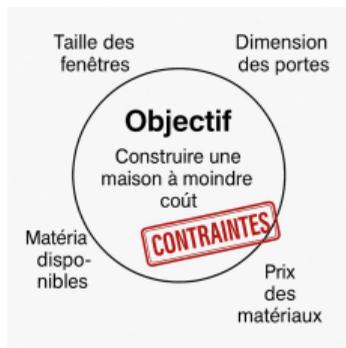
Exemple de problème d'optimisation combinatoire

Problème du voyageur de commerce

- 🚗 Visiter un ensemble de villes (modélisée par des sommets dans un graphe)
 - ▶ Dans quel ordre, si le but est de minimiser la distance parcourue ?
 - ▶ Toute permutation est une solution, quelle est la meilleure ?
- ⚙️ avec 4 villes : (1,2,3,4,1) (1,3,2,4,1) (1,4,2,3,1) (1,4,3,2,1), ...
- ➔ $n!/2$ solutions (ici $4!/2=4*3=12$)
- ▶ Pour 60 villes, il y a **plus de solutions que d'atomes dans l'univers**
- ⚙️ On va rechercher un algorithme permettant de trouver une très bonne solution



Démarche en recherche opérationnelle : Vue d'ensemble



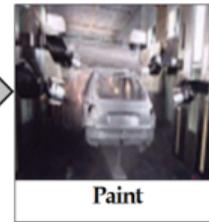
Domaines d'applications

Domaines d'application de la RO

Planification et Ordonnancement



- ▶ ordonnancer des tâches
- ▶ ordonnancer les pièces sur une chaîne d'assemblage
- ▶ Exemple : Car sequencing (Renault)



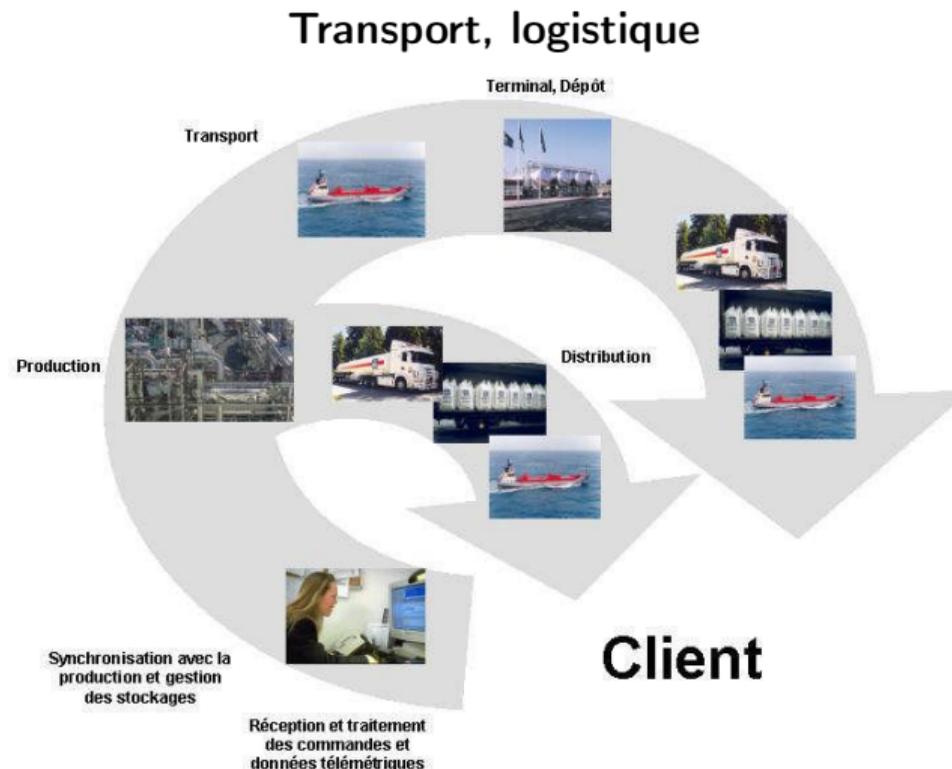
| | | juil 2018 | | | | Nov 2018 | | | | mars 2019 | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------|------------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 17/07 | 24/07 | 31/07 | 07/08 | 04/11 | 11/11 | 18/11 | 25/11 | 02/12 | 09/12 | 16/12 | 23/12 | 30/12 | 06/01 | 13/01 | 20/01 | 27/01 |
| DEMANDES CLIENTS | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | DEMANDE | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | Charbonne | 0 | 2 | 5 | 5 | 2 | 2 | 2 | | | | 2 | 4 | 4 | 1 | | | |
| 12 | Charbonne | 2K + 5ans | 3 | 1 | | | | | | | | 4 | 1 | 1 | | | | |
| 13 | Charbonne | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | Charbonne | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | Limousine | 0 | | | | | | | | | | 2 | 1 | 1 | | | | |
| 16 | Limousine | 2K + 5ans | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | 1 | 2 |
| 17 | Limousine | VR + 8 ans | 5 | | | 2 | 1 | | | | | | | | | | | |
| 18 | Limousine | 0 | 1 | 1 | | 2 | 1 | 1 | | | | | | | | | | 4 |
| 19 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | 2 |
| 24 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | Limousine | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 33 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 34 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 35 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 36 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 37 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 38 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 39 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 40 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 41 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 42 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 43 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 44 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 45 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 46 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 47 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 48 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 49 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 50 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 51 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 52 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 53 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 54 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 55 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 56 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 57 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 58 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 59 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 60 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 61 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 62 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 63 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 64 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 65 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 66 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 67 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 68 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 69 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 70 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 71 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 72 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 73 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 74 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 75 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 76 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 77 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 78 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 79 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 80 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 81 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 82 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 83 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 84 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 85 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 86 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 87 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 88 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 89 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 90 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 91 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 92 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 93 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 94 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 95 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 96 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 97 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 98 | Char ou Lim | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 99 | Char ou Lim | 2K + 5ans | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 100 | Char ou Lim | VR + 8 ans | | | | | | | | | | | | | | | | |

Gestion des Ressources Humaines

The Air France logo, featuring the word "AIRFRANCE" in a bold, sans-serif font with a red and blue chevron to the right, all contained within a white rounded rectangle on a dark blue background.

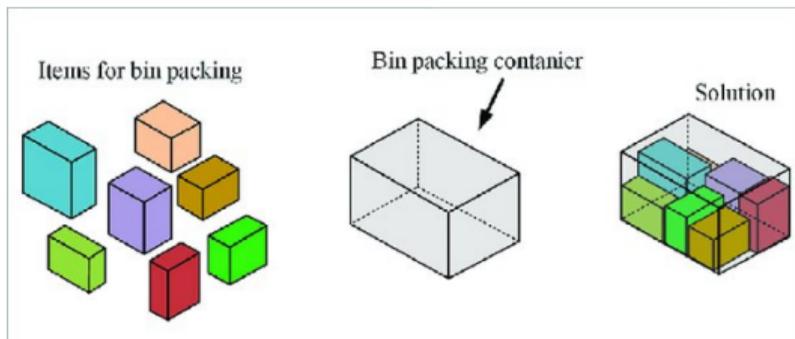
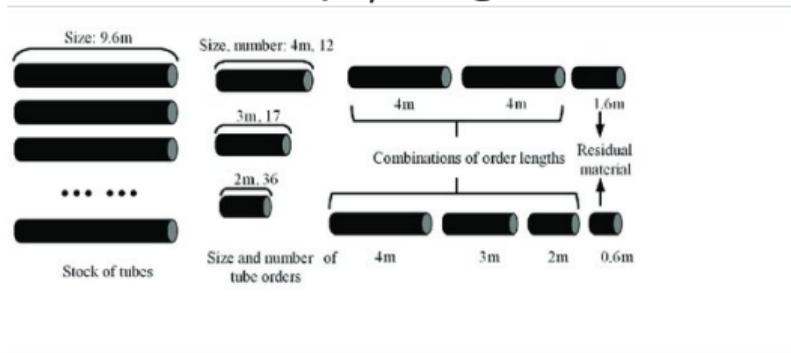
- ▶ Faire un planning de personnel
- ▶ Exemple : construction des plannings des Personnels Navigants Commerciaux (PNC) chez **AirFrance**

Domaines d'application de la RO



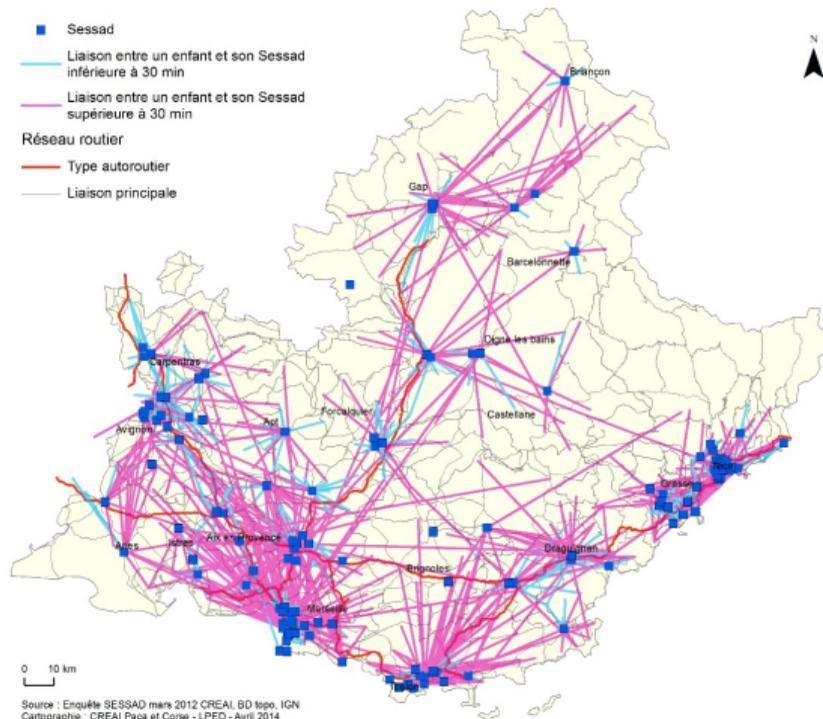
- ▶ Optimisation des tournées de véhicules, distribution
- ▶ Organisation de centres logistiques

Découpe/Rangement



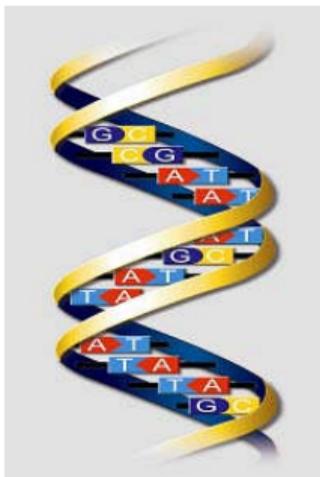
Domaines d'application de la RO

Routage



Domaines d'application de la RO

Santé



| | H^r | H^g | H^b | |
|---|-------|-------|-------|--|
| 1 | 3 | 0 | | |
| 2 | 4 | 1 | | |
| 2 | 2 | 3 | | |
| 3 | 1 | 2 | | |
| 1 | 1 | 2 | | |
| 3 | 2 | 2 | | |
| 3 | 2 | 4 | | |
| 3 | 2 | 2 | | |
| 2 | 2 | 2 | | |
| 2 | 2 | 2 | | |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| r | r | g | g | g | | | | | |
| r | r | g | g | g | | | | | b |
| r | r | g | g | g | | b | b | b | |
| r | r | r | | g | | b | b | | |
| | r | | | | | b | b | g | |
| b | b | b | b | r | r | r | r | g | g |
| b | b | b | b | r | r | r | r | g | g |
| g | g | b | b | | | r | r | r | r |
| | g | g | b | b | | | | r | r |
| | g | g | b | b | | | | r | r |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-------|
| 1 | 4 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | V^r |
| 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 4 | 2 | 0 | 3 | 2 | V^g |
| 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | V^b |

- ▶ reconstruire des chaînes d'ADN connues partiellement
- ▶ planifier l'utilisation des blocs opératoires, et des horaires du personnel
- ▶ reconstruire des images colorées à partir de deux projections orthogonales

ARTICLE IN PRESS

European Journal of Operational Research xxx (xxxx) xxx



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

European Journal of Operational Research

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eor



Invited Review in Celebration of the 50th Anniversary of EURO

Fifty years of portfolio optimization

Ahti Salo^{a,*}, Michalis Doumpos^c, Juuso Liesiö^b, Constantin Zopounidis^{c,d}

^a Department of Mathematics and Systems Analysis, Aalto University School of Science, Finland

^b Department of Information and Service Management, Aalto University School of Business, Finland

^c Financial Engineering Laboratory, School of Production Engineering and Management, Technical University of Crete, Greece

^d Audencia Business School, France

ARTICLE INFO

Keywords:

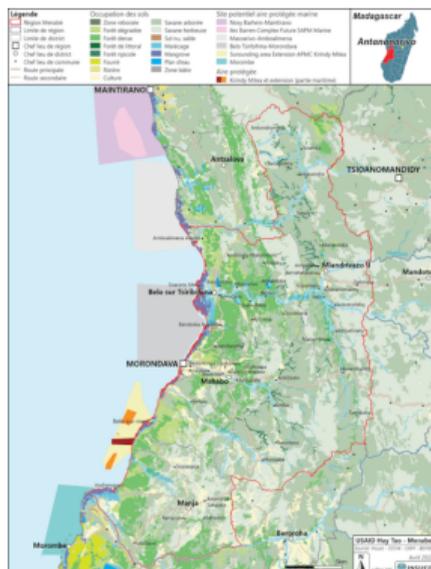
Portfolio optimization
Multiattribute value/utility theory
Multicriteria decision aiding
Portfolio decision analysis
Resource allocation

ABSTRACT

The allocation of resources to alternative investment opportunities is one of the most important decisions organizations and individuals face. These decisions can be guided by building and solving portfolio optimization models that capture the salient aspects of the investment problem, including decision-makers' preferences, multiple objectives, and decision opportunities over the planning horizon. In this paper, we give a historically grounded overview of portfolio optimization which, as a field within operational research with roots in finance, is vast thanks to many decades of research and the huge diversity of problems that have been tackled. In particular, we provide a unified and therefore unique treatment that covers the full breadth of portfolio optimization problems, including, for instance, the allocation of resources to financial assets and the selection of indivisible assets such as R&D projects. We also identify opportunities for future methodological and applied research, hoping to inspire researchers to contribute to the growing field of portfolio optimization.



Environnement et développement durable

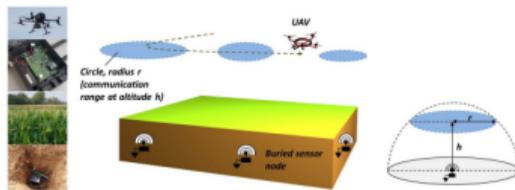


Results in Engineering
Volume 20, December 2023, 101603



Performance optimization of water distribution network using meta-heuristic algorithms from the perspective of leakage control and resiliency factor (case study: Tehran water distribution network, Iran)

Aiireza Shahhosseini ^a, Mohsen Najari ^b, Mohammad Mahdi Najafzadeh ^c, Mohammad Mirhoseini Hezaveh ^b



- ▶ protection d'espèce via la planification spatiale marine
- ▶ gestion des ressources d'eau
- ▶ gestion des sols en agriculture

Mon modèle de base : la programmation linéaire

Approche méthodologique

- ▶ J'utilise des méthodes de résolution (algorithmes) permettant de construire des solutions sur des problèmes bien formulés (modèles).

Mon modèle de base : la programmation linéaire

Approche méthodologique

- ▶ J'utilise des méthodes de résolution (algorithmes) permettant de construire des solutions sur des problèmes bien formulés (modèles).
- ➔ Trouver des **valeurs** aux inconnues du problèmes sachant certaines **contraintes** dans le but de **maximiser ou minimiser** un certain objectif

Mon modèle de base : la programmation linéaire

Approche méthodologique

- ▶ J'utilise des méthodes de résolution (algorithmes) permettant de construire des solutions sur des problèmes bien formulés (modèles).
- ➔ Trouver des **valeurs** aux inconnues du problèmes sachant certaines **contraintes** dans le but de **maximiser ou minimiser** un certain objectif

Formulation mathématique

maximiser *Objectif*(x_1, x_2, \dots) s.t.

$$\left\{ \begin{array}{lll} \text{Contraintes 1}(x_1, x_2) & \leq & \text{borne1} \\ \text{Contraintes 2}(x_1, x_2) & \geq & \text{borne2} \\ & \dots & \dots \\ x_1, x_2, \dots & \geq & 0 \end{array} \right.$$

La programmation linéaire

L'objectif : Min coût / Max Profit $c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$

Satisfaire la demande : $a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \geq b_1$

Avec des ressources limitées : $a'_1x_1 + a'_2x_2 + \dots + a'_nx_n \leq b'_1$

Quantités produites (variables de décision) : $x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$

Exemple simple n°1 de Programme Linéaire

Une ferme du Finistère produit des **artichauts**, des **betteraves** et des **carottes** avec deux engrais naturels (des solutions liquides à base d'**algues** et de **purin**).

La production d'un légume demande un temps de main d'œuvre (en h/kg) et une quantité d'engrais (en l/kg).

⇒ Il faut produire (en tout) 120 kg pour répondre à la demande locale.

| | Temps de main d'œuvre (h/kg) | Algues (l/kg) | Purin (l/kg) |
|------------|------------------------------|---------------|--------------|
| Artichauts | 4 | 1 | 3 |
| Betteraves | 2 | 3 | 5 |
| Carottes | 3 | 5 | 2 |
| Stocks | | 260 Litres | 340 Litres |

⇒ Quelles quantités de légumes produire pour minimiser le temps de main d'œuvre ?

Solution de l'exemple n°1

Résolution avec un solveur en ligne glpk

Solve a CPLEX problem online

Minimize

obj: + 4 x_A + 2 x_B + 3 x_C

Subject To

algues: 1 x_A + 3 x_B + 5 x_C <= 260

purin: 3 x_A + 5 x_B + 2 x_C <= 340

quantite : x_A + x_B + x_C >= 120

Generals

x_A

x_B

x_C

End

Exemple simple n°2 de Programme Linéaire (en nombre entier)

Les données du problème sont :

- ▶ ensemble d'espèces : $E = e_1, e_2 \dots e_p$
- ▶ ensemble de zones : $S = s_1, s_2 \dots s_n$
- ▶ $a_{ij} = 1$ si, l'espèce e_i survivra si on protège la zone s_j , 0 sinon

On souhaite sélectionner un nombre minimal de zones afin de protéger toutes les espèces de E.

Le modèle de programme linéaire :

- ▶ Variables $x_j = 1$ si on protège la zone s_j , 0 sinon, $j = 1, 2 \dots n$

$$\min \sum_{j=1}^{j=n} x_j$$

$$\sum_{j=1}^{j=n} a_{ij} x_j \geq 1 \quad \forall i = 1, 2 \dots p$$

Exemple simple n°3 : le problème du sac à dos

On dispose de n objets ($i = 1..n$). Chaque objet i a une valeur v_i et un poids p_i . Quels sont les objets que j'emporte dans mon sac si je veux maximiser la valeur totale de mon sac et respecter une contrainte de poids maximal P ?

Le modèle de programme linéaire :

- ▶ Variables $x_i = 1$ si on emporte l'objet i 0 sinon, $i = 1, 2, \dots, n$

$$\max \sum_{i=1}^{i=n} v_i x_i$$

$$\sum_{i=1}^{i=n} p_i x_i \leq P$$

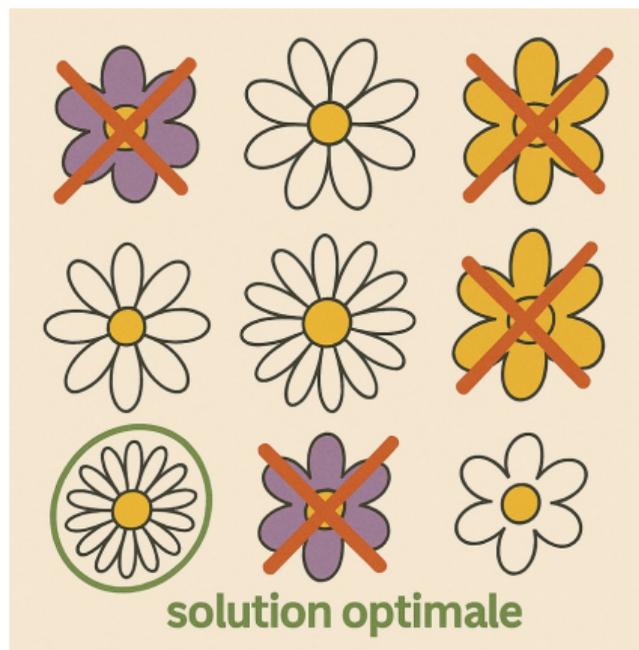
Mes outils : méthode exacte versus méthode heuristique ?



J'examine les fleurs une à une



Je chemine intelligemment mais ça me prend beaucoup de temps...



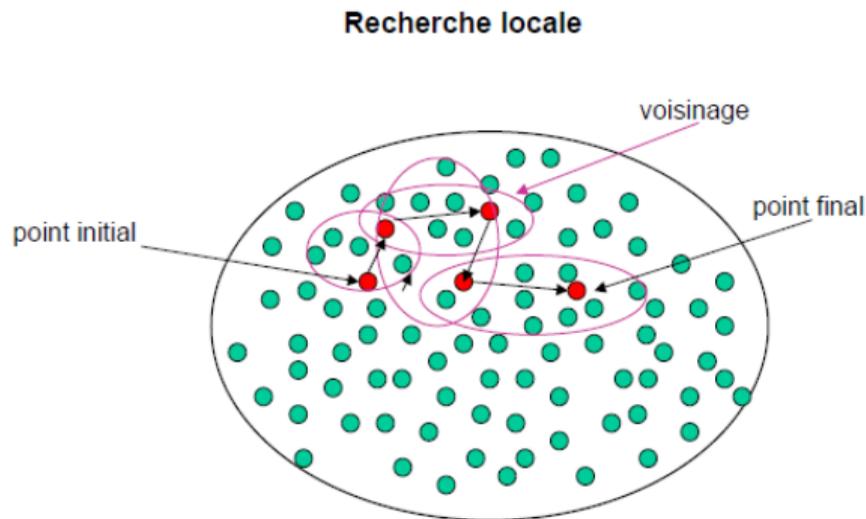
J'utilise de la potion magique : la métaheuristique



Méthodes heuristiques en Recherche Opérationnelle

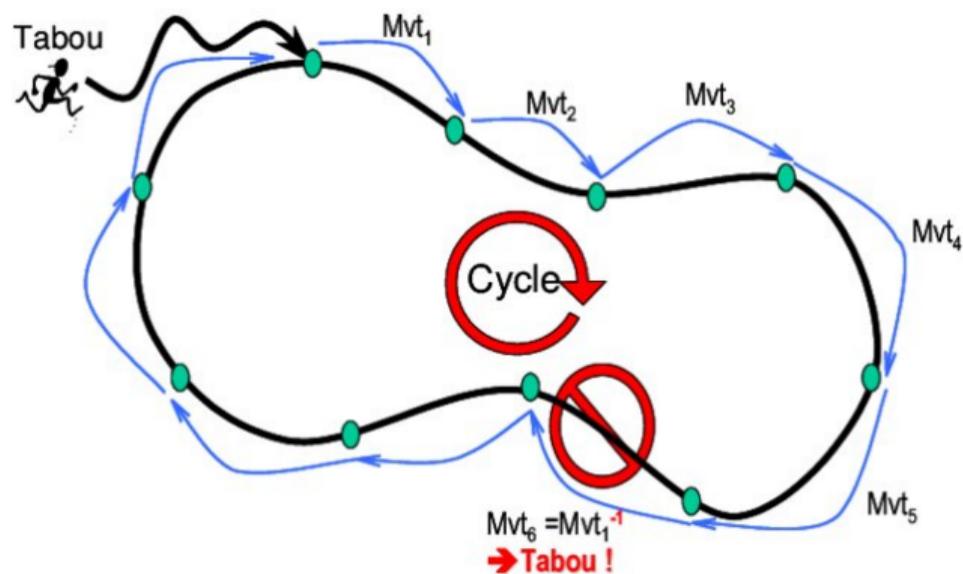
- ▶ Recherche locale
- ▶ Recherche tabou
- ▶ Recuit simulé
- ▶ Algorithme de colonies de fourmis
- ▶ Optimisation par essaims particulaires (PSO)
- ▶ Algorithmes génétiques

Recherche locale



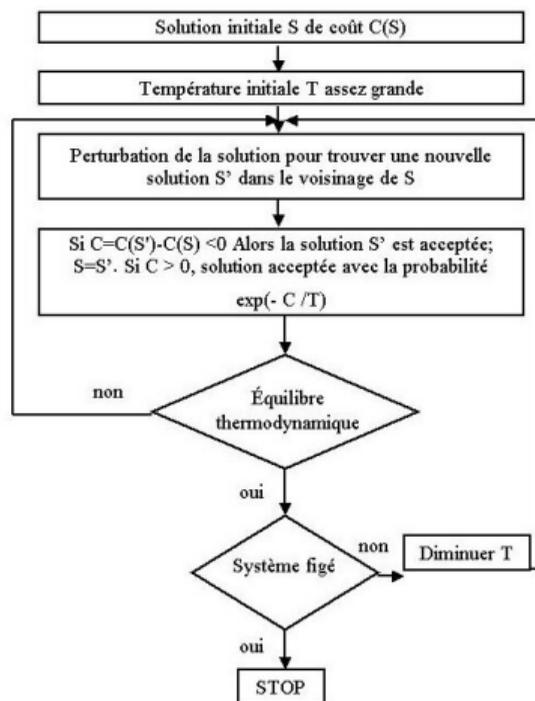
Algorithme qui explore l'espace des solutions à partir d'un point de départ initial en se déplaçant vers des voisins améliorants, cherchant à améliorer progressivement la solution.

Recherche tabou



Méthode de recherche locale qui évite de rester bloqué dans des optima locaux en interdisant de revisiter des solutions déjà explorées pendant un certain nombre d'itérations.

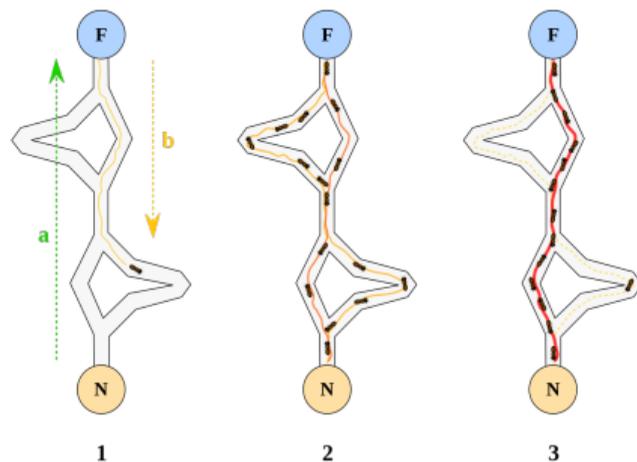
Recuit simulé



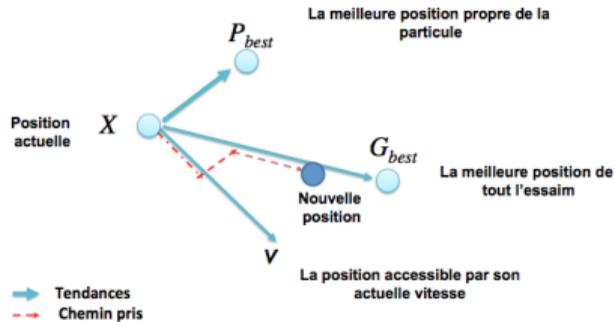
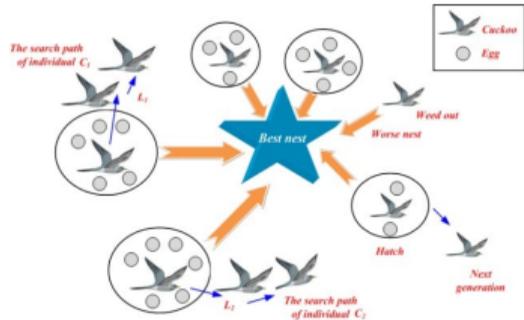
Méthode inspirée du processus de recuit métallurgique, qui permet d'explorer l'espace des solutions en acceptant occasionnellement des solutions pires que la solution actuelle pour éviter de rester coincé dans des optima locaux.

Algorithme de colonies de fourmis

Inspiré par le comportement des fourmis, cet algorithme simule le processus de recherche de nourriture par les fourmis pour trouver des solutions de qualité pour des problèmes d'optimisation.

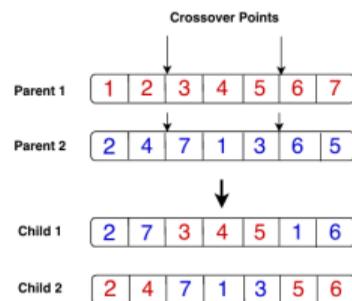
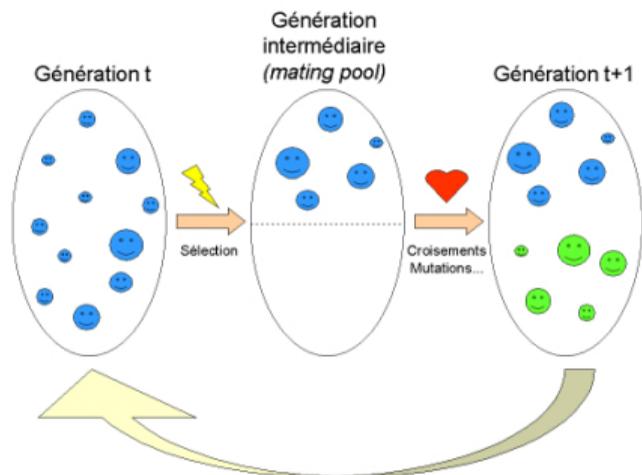


Optimisation par essais particuliers (PSO)



Inspiré par le comportement de recherche de nourriture des oiseaux et des poissons en groupe, cet algorithme utilise un ensemble de solutions potentielles appelées particules pour explorer l'espace de recherche.

Algorithmes génétiques



Inspirés par le processus de sélection naturelle, ces algorithmes utilisent des opérateurs génétiques tels que la reproduction, la mutation et la sélection pour explorer l'espace des solutions.

Exemples de travaux en RO à FEMTO-ST

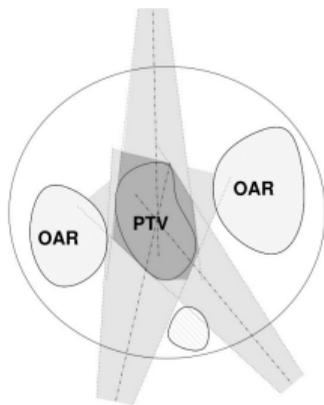
Optimisation de la dose en curiethérapie

Contexte

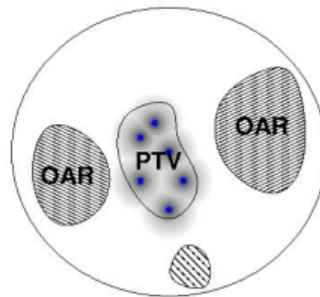
- ▶ Thèse F.Galéa (2003-2006) : Problèmes d'optimisation en curiethérapie
- ▶ Partenaire : Gilbert Boisserie, de l'Unité de Physique du service de radiothérapie de l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière à Paris

Objectif

Irradier convenablement la tumeur et protéger les organes à risques



La radiothérapie externe



La curiethérapie

Deux sortes de curiethérapie

- ▶ Curiothérapie à bas débit de dose (LDR) cas de la prostate : sources ponctuelles d'iode 125
- ▶ Curiothérapie à haut débit de dose (HDR) et à débit de dose pulse (PDR)
 - ▶ utilisation d'une seule source d'iridium 192
 - ▶ déplacement à l'intérieur de cathéters/vecteurs
 - ▶ arrêt sur différentes positions pour des temps déterminés

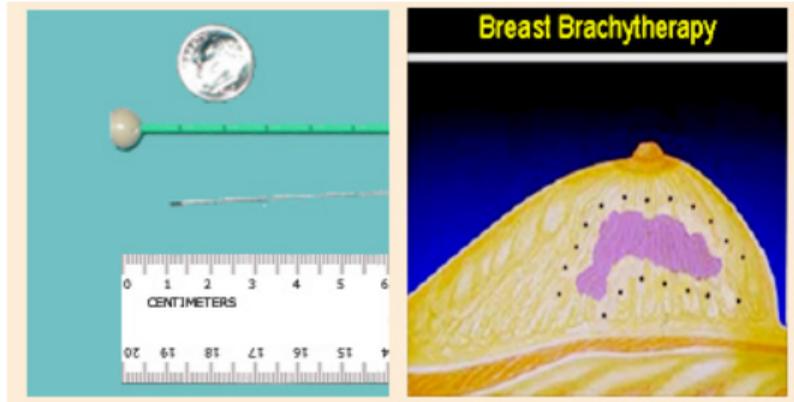
Débit de dose reçu en point i à partir d'une source en position j

$$d(i, j) = \lambda S_k \phi_{ang}(dist(i, j)) / dist(i, j)^2,$$

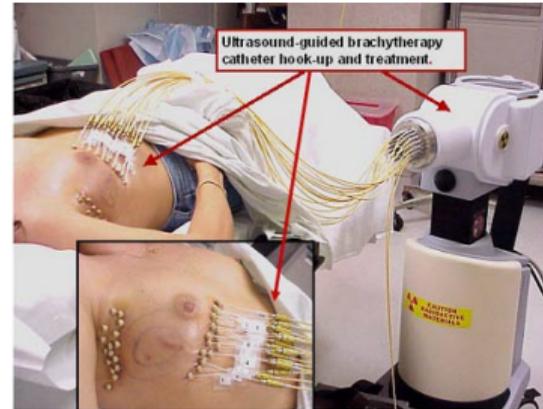
Dose reçue en i par une source s'arrêtant un temps t_j en position j

$$d(i) = \sum_{j \in J} d(i, j) \cdot t_j.$$

Exemple : traitement du cancer du sein



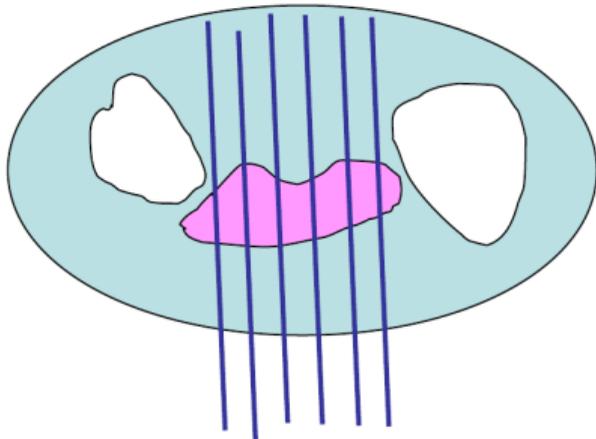
Traitement LDR



Traitement HDR

Processus de traitement HDR

1. Localiser le volume cible (imagerie 3D) ;
2. **Déterminer un bon schéma d'implantation pour les vecteurs ;**
3. Placer les vecteurs ;
4. Détecter les positions d'arrêt possibles pour les sources radioactives ;
5. **Calculer les temps d'arrêt ;**
6. Appliquer le traitement.



Outil de placement des cathéters

- ▶ Respect des règles du système de Paris (1960)
- ▶ Traitement de volumes géométriques simples (1 ou 2 plans de vecteurs)
- ▶ Vecteurs parallèles et équidistants d'une distance δ
- ▶ Intégration à un logiciel de visualisation de la couverture du volume cible par la dose requise selon différentes valeurs de paramètres (écartement des vecteurs, positions et temps d'arrêt optimisés)

Modèle de calcul des temps d'arrêt

Données :

- ▶ P ensemble des points de calcul, H ensemble des points de surdosage

Variables :

Modèle de calcul des temps d'arrêt

Données :

- ▶ P ensemble des points de calcul, H ensemble des points de surdosage
- ▶ $d(i, j)$: contribution de débit dose d'une source placée à la position d'arrêt j (J ensemble des points d'arrêt possibles) sur le point i

Variables :

Modèle de calcul des temps d'arrêt

Données :

- ▶ P ensemble des points de calcul, H ensemble des points de surdosage
- ▶ $d(i, j)$: contribution de débit dose d'une source placée à la position d'arrêt j (J ensemble des points d'arrêt possibles) sur le point i
- ▶ $\underline{D}_i, \overline{D}_i$: bornes inférieure et supérieure de dose sur le point i

Variables :

Modèle de calcul des temps d'arrêt

Données :

- ▶ P ensemble des points de calcul, H ensemble des points de surdosage
- ▶ $d(i, j)$: contribution de débit dose d'une source placée à la position d'arrêt j (J ensemble des points d'arrêt possibles) sur le point i
- ▶ $\underline{D}_i, \overline{D}_i$: bornes inférieure et supérieure de dose sur le point i
- ▶ α_i, β_i : pénalités liées aux dépassements de bornes au point i

Variables :

Modèle de calcul des temps d'arrêt

Données :

- ▶ P ensemble des points de calcul, H ensemble des points de surdosage
- ▶ $d(i, j)$: contribution de débit dose d'une source placée à la position d'arrêt j (J ensemble des points d'arrêt possibles) sur le point i
- ▶ $\underline{D}_i, \overline{D}_i$: bornes inférieure et supérieure de dose sur le point i
- ▶ α_i, β_i : pénalités liées aux dépassements de bornes au point i

Variables :

- ▶ t_j : temps d'arrêt sur la position j

Modèle de calcul des temps d'arrêt

Données :

- ▶ P ensemble des points de calcul, H ensemble des points de surdosage
- ▶ $d(i, j)$: contribution de débit dose d'une source placée à la position d'arrêt j (J ensemble des points d'arrêt possibles) sur le point i
- ▶ $\underline{D}_i, \overline{D}_i$: bornes inférieure et supérieure de dose sur le point i
- ▶ α_i, β_i : pénalités liées aux dépassements de bornes au point i

Variables :

- ▶ t_j : temps d'arrêt sur la position j
- ▶ u_i, v_i : dépassements de borne inférieure et supérieure au point de référence i

Modèle de calcul des temps d'arrêt

Données :

- ▶ P ensemble des points de calcul, H ensemble des points de surdosage
- ▶ $d(i, j)$: contribution de débit dose d'une source placée à la position d'arrêt j (J ensemble des points d'arrêt possibles) sur le point i
- ▶ $\underline{D}_i, \overline{D}_i$: bornes inférieure et supérieure de dose sur le point i
- ▶ α_i, β_i : pénalités liées aux dépassements de bornes au point i

Variables :

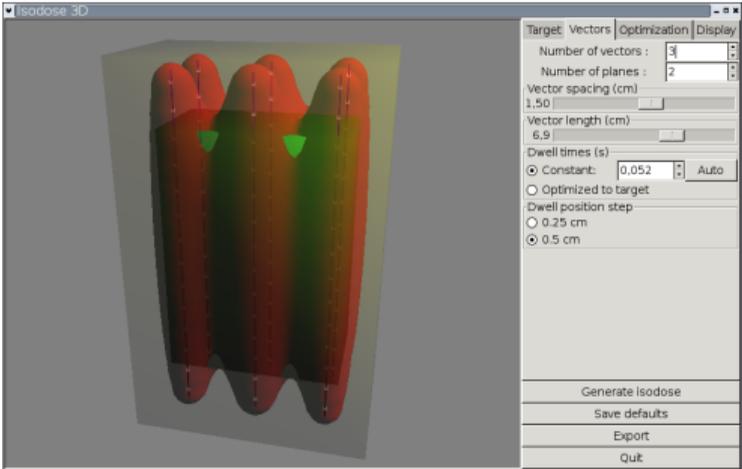
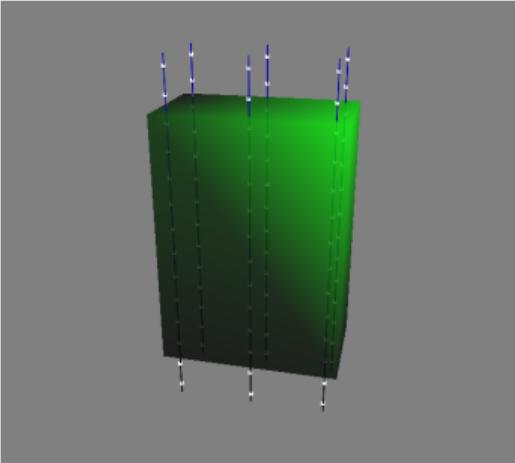
- ▶ t_j : temps d'arrêt sur la position j
- ▶ u_i, v_i : dépassements de borne inférieure et supérieure au point de référence i

$$\left\{ \begin{array}{ll} \min & \sum_{i \in P} \alpha_i u_i + \beta_i v_i \\ \text{sous :} & \sum_{j \in J} d(i, j) \cdot t_j + u_i \geq \underline{D}_i \quad \forall i \in P \\ & \sum_{j \in J} d(i, j) \cdot t_j - v_i \leq \overline{D}_i \quad \forall i \in P \\ & \sum_{j \in J} d(h, j) \cdot t_j \leq 2 \quad \forall h \in H \\ & u_i, v_i \geq 0 \quad \forall i \in P \\ & t_j \geq 0 \quad \forall j \in J \end{array} \right.$$

Dose reçue au point i (pointing to the first constraint)

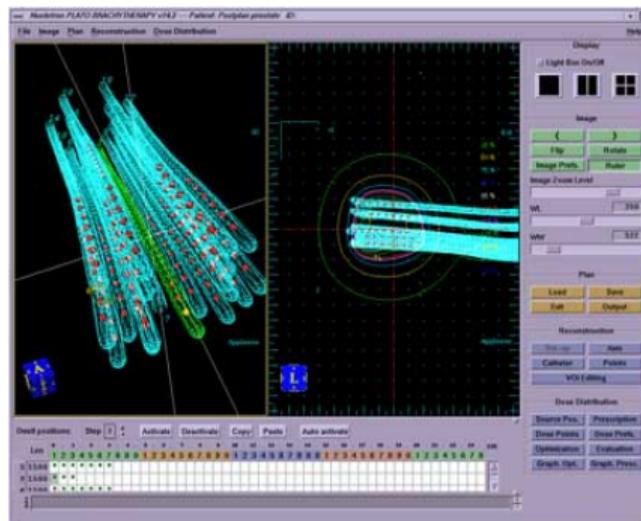
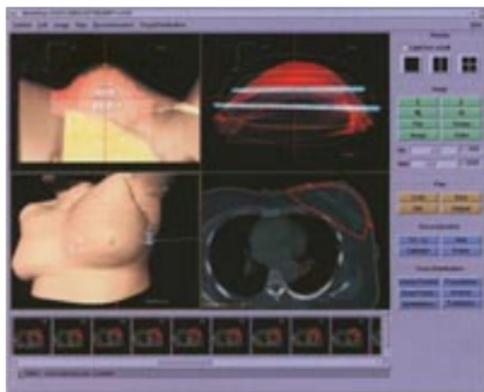
Dose inférieure et supérieure (pointing to the second and third constraints)

On teste sur des cas simples ?



Et après ?

- ▶ dépôt logiciel sous licence GNU Isodose3D
- ▶ autres outils logiciels commercialisés



Dimensionnement et pilotage d'un système énergétique

Contexte

- ▶ Thèse S. Basnet (2021-2024) : Simulation d'un écosystème hydrogène
- ▶ Cas d'étude de la ville de Dijon (~ 260000 hab, $\sim 40 \text{ km}^2$)

Objectifs

- ▶ Dimensionner et piloter un système énergétique hybride incluant :
 - ▶ des sources d'énergie renouvelables : panneaux photovoltaïques solaires, éoliennes
 - ▶ des composants clés de l'hydrogène : électrolyseur, réservoir de stockage d'H₂ et des stations de ravitaillement.

Objectifs

- ▶ Dimensionner et piloter un système énergétique hybride incluant :
 - ▶ des sources d'énergie renouvelables : panneaux photovoltaïques solaires, éoliennes
 - ▶ des composants clés de l'hydrogène : électrolyseur, réservoir de stockage d' H_2 et des stations de ravitaillement.
- ▶ Pour satisfaire les besoins en électricité de la ville (350 MWh/jour) et la demande en H_2 d'une flotte de bus (414 kg/jour)

Objectifs

- ▶ Dimensionner et piloter un système énergétique hybride incluant :
 - ▶ des sources d'énergie renouvelables : panneaux photovoltaïques solaires, éoliennes
 - ▶ des composants clés de l'hydrogène : électrolyseur, réservoir de stockage d' H_2 et des stations de ravitaillement.
- ▶ Pour satisfaire les besoins en électricité de la ville (350 MWh/jour) et la demande en H_2 d'une flotte de bus (414 kg/jour)
- ▶ A moindre coût, avec la plus grande part de renouvelable, avec le plus faible impact carbone

Système étudié

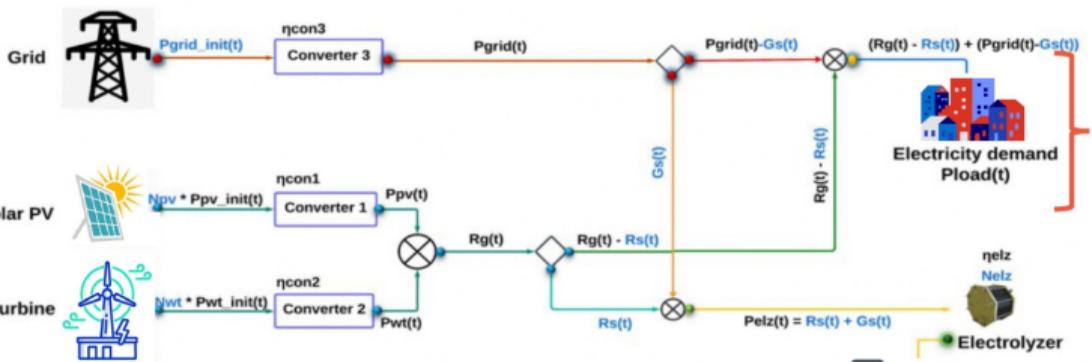
Données

Prix d'électricité

Données

Irradiation solaire

Vitesse Du vent



Données

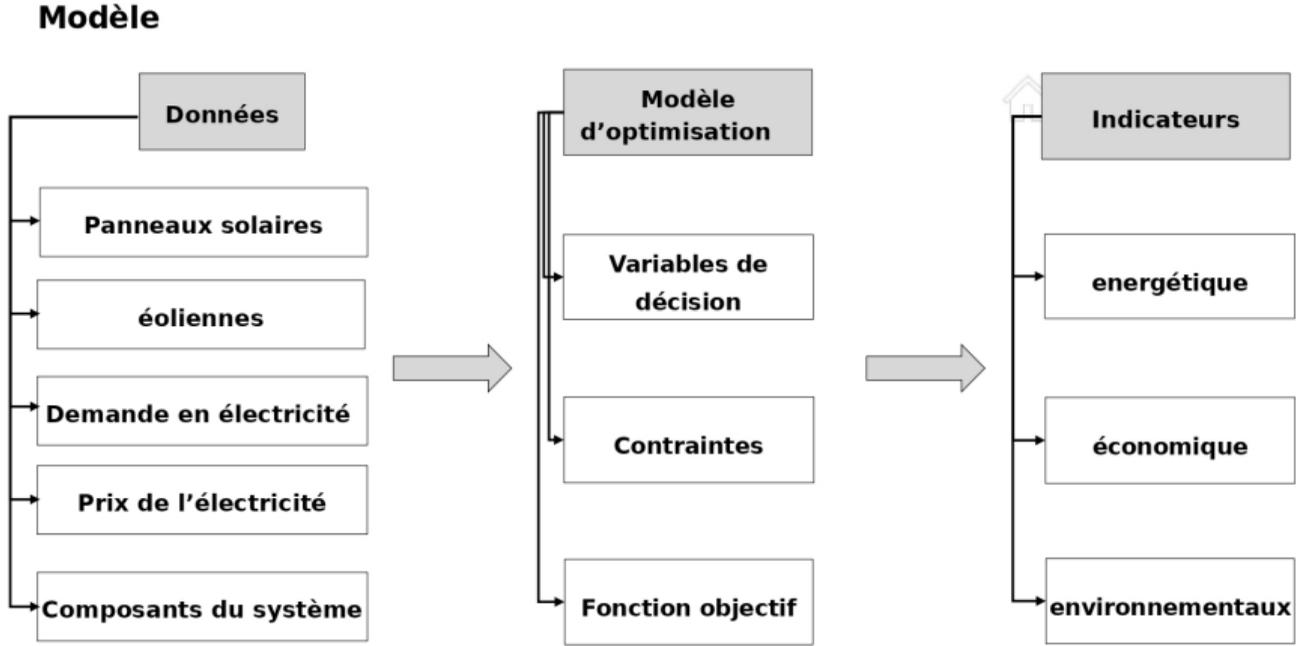
Demande En électricité

- Hydrogen
- Renewable generation
- Grid import

Legends



Système étudié



Variables de décision : dimensionnement



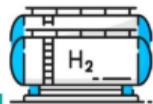
Nombre de
panneaux **Npv**



Nombre
d'éoliennes **Nwt**



Nombre
d'électrolyseurs **Nelz**



Taille
réservoir **LOH_H2_tank_max**

Variables de décision : pilotage



Electricité du
réseau **Pgrid,init**



Perte **Pwaste**



Part de l'électricité
renouvelable
vers l'électrolyseur **Rs**



Part de l'électricité du
réseau vers
l'électrolyseur **Gs**

Système étudié

Objectif économique

Minimiser Coût annuel total (TAC) €M/an

Σ



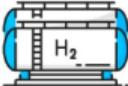
Coûts investissement (Capex)



Coûts d'opérations et de maintenance (Opex)



Coûts d'achat de l'électricité du réseau



Objectif bas carbone

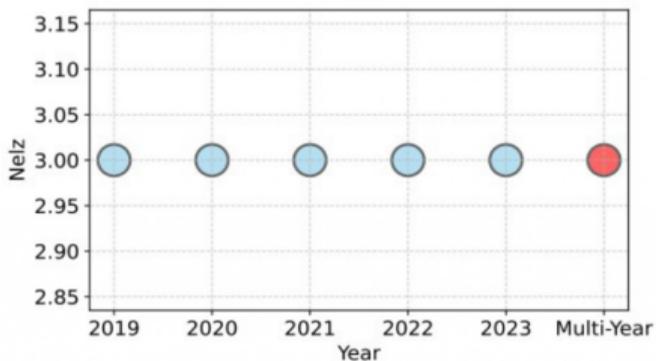
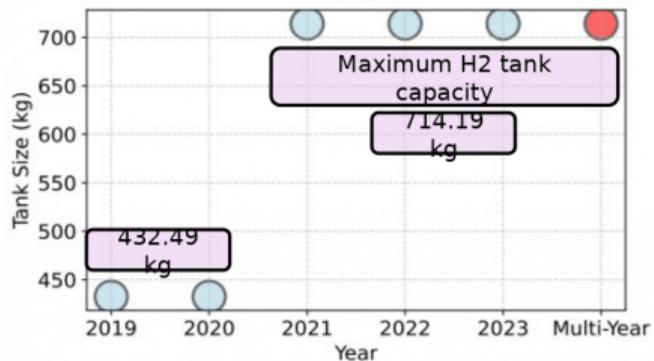
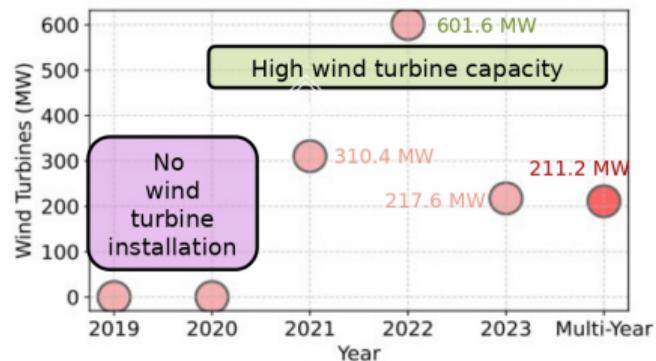
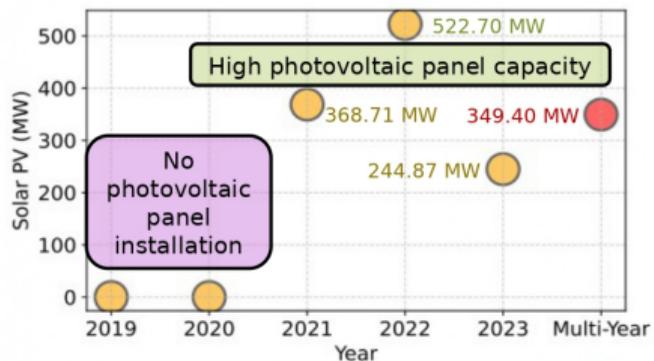
Minimiser Emission totale de CO2



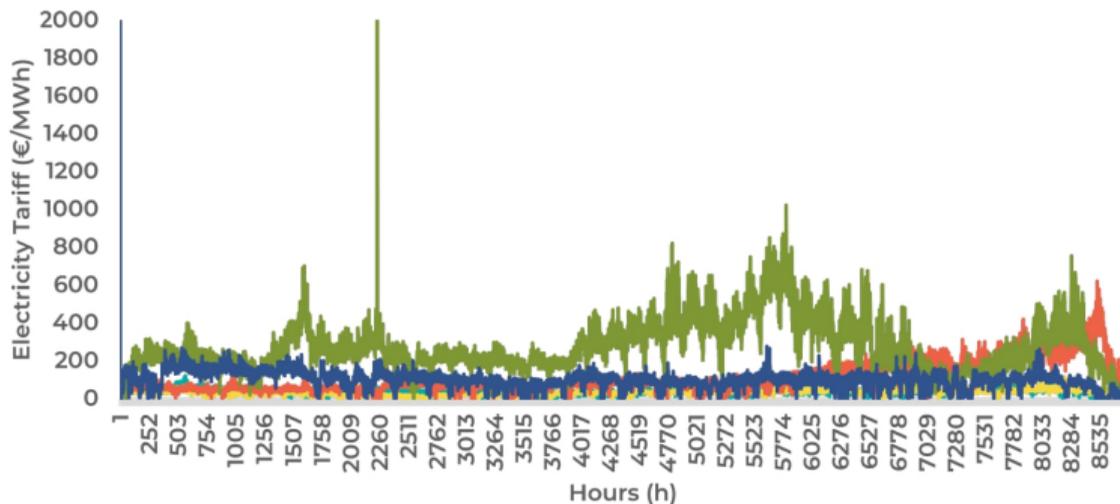
Minimize: $TAC = f(N_{pv}, N_{wt}, N_{elz}, LOH_{H2_{tank,max}}, P_{grid,init}(t), R_s(t), G_s(t), P_{waste}(t))$

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \begin{aligned}
 P_{pv,init}(t) &= \eta_{pv}(t) \cdot DF \cdot A_{pv} \cdot T_i(t), \quad \forall t \in [0, T-1] \\
 P_{wt,init}(t) &= \begin{cases} 0, & V(t) \leq V_{cin} \text{ or } V(t) \geq V_{cout} \\
 P_{R_{wt}}, & V_R \leq V(t) \leq V_{cout} \\
 P_{R_{wt}} \cdot \frac{V(t)^3 - V_{cin}^3}{V_R^3 - V_{cin}^3}, & V_{cin} \leq V(t) \leq V_R \end{cases}, \quad \forall t \in [0, T-1] \\
 P_{pv}(t) &= P_{pv,init}(t) \cdot \eta_{com1}, \quad \forall t \in [0, T-1] \\
 P_{wt}(t) &= P_{wt,init}(t) \cdot \eta_{com2}, \quad \forall t \in [0, T-1] \\
 P_{grid}(t) &= P_{grid,init}(t) \cdot \eta_{com3}, \quad \forall t \in [0, T-1] \\
 R_g(t) &= N_{pv} \cdot P_{pv}(t) + N_{wt} \cdot P_{wt}(t), \quad \forall t \in [0, T-1] \\
 P_{load}(t) &= (R_g(t) - R_s(t)) + (P_{grid}(t) - G_s(t)) - P_{waste}(t), \quad \forall t \in [0, T-1] \\
 P_{elz}(t) &= R_s(t) + G_s(t), \quad \forall t \in [0, T-1] \\
 P_{elz}(t) &\leq N_{elz} \cdot P_{elz,unit,max}, \quad \forall t \in [0, T-1] \\
 P_{elz}(t) &\geq N_{elz} \cdot P_{elz,unit,max} \cdot s_{min}, \quad \forall t \in [0, T-1] \\
 m_{H2_{elz,out}}(t) &= \frac{P_{elz}(t) \cdot \Delta t \cdot \eta_{elz}}{HHV}, \quad \forall t \in [0, T-1] \\
 m_{ch,tank}(t) &= m_{H2_{elz,out}}(t) \cdot \eta_{iscn}, \quad \forall t \in [0, T-1] \\
 m_{dch,tank}(t) &= m_{H2_{load}}(t), \quad \forall t \in [0, T-1] \\
 LOH_{H2_{tank}}[0] &= LOH_{H2_{tank,max}} \cdot s_{min} \\
 LOH_{H2_{tank}}(t) &\geq LOH_{H2_{tank,max}} \cdot s_{min}, \quad \forall t \in [1, T-1] \\
 LOH_{H2_{tank}}(t) &\leq LOH_{H2_{tank,max}} \cdot s_{max}, \quad \forall t \in [1, T-1] \\
 LOH_{H2_{tank}}(t) &= LOH_{H2_{tank}}(t-1) + m_{ch,tank}(t) - m_{dch,tank}(t), \quad \forall t \in [1, T-1] \\
 0 &\leq N_{pv} \leq N_{pv,max} \\
 0 &\leq N_{wt} \leq N_{wt,max} \\
 0 &\leq N_{elz} \leq N_{elz,max}
 \end{aligned} \right. \quad (C1)
 \end{aligned}$$

Résultats



Résultats



— 2019 — 2020 — 2021 — 2022 — 2023

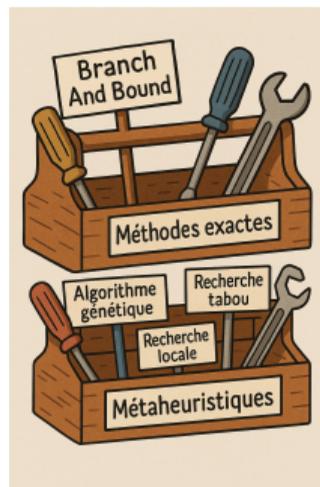
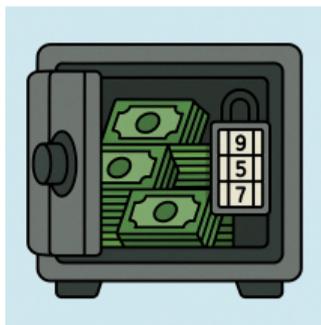
Prix horaire de l'électricité du réseau



Conclusion et Perspectives

Mon travail de recherche

- ▶ Trouver la meilleure "combinaison" à un problème d'optimisation "combinatoire"
- ▶ Avec des modèles et des outils.
- ▶ Il faut bien modéliser, et utiliser les bons outils ou en inventer de nouveaux
- ▶ Certains problèmes sont plus faciles (P) que d'autres (NP) ?



ROADEF

.....
SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE RECHERCHE OPÉRATIONNELLE
ET D'AIDE À LA DÉCISION



Le défi d'un million de dollars

Est-ce que $P = NP$?



Trouver la solution à un puzzle peut être très long

Mais quand on vous donne la solution, vous pouvez facilement vérifier qu'elle est correcte



La grande question :

Est-ce que chaque problème dont on peut *vérifier* rapidement la solution peut aussi être *résolu* rapidement ?

Si OUI ($P = NP$)

Si NON ($P \neq NP$)

- création de médicaments, planification parfaite, cassage de mots de passe...



Certains problèmes resteront durs, même pour des superordinateurs



Personne ne connaît encore la réponse!