

# HAI802I Algorithmique Avancée — TDs

Ivan Lejeune

26 février 2026

## Table des matières

1	Complexité . . . . .	3
1.1	Quelques preuves en complexité des problèmes . . . . .	3
1.2	Quelques problèmes dans les graphes . . . . .	4
1.3	La classe de complexité $co\mathcal{NP}$ . . . . .	5
1.4	Rappels en complexité . . . . .	6
2	Algorithmes d'approximation . . . . .	7
2.1	La classe <b>Log-APX</b> . . . . .	7
2.2	La classe <b>APX</b> . . . . .	7
2.3	Mesure différentielle . . . . .	8
2.4	Construction d'un FPTAS . . . . .	9
2.5	Polynomial-Time Asymptotic Scheme : PTAS . . . . .	9
2.6	Points extrêmes . . . . .	9
2.7	FPTAS et programmation dynamique . . . . .	9
2.8	Schéma primal-dual . . . . .	10
3	Inapproximabilité ou seuil d'approximation . . . . .	11
3.1	Seuil d'approximation . . . . .	11
3.2	Utilisation du principe Gap-réduction . . . . .	11
4	Méthodes exactes . . . . .	12
4.1	Programmation dynamique . . . . .	12
4.2	Arbres de branchement . . . . .	12
5	Réductions divers . . . . .	13
5.1	$L$ -réduction . . . . .	13
6	Quelques problèmes d'ordonnancement . . . . .	14
6.1	Ordonnancement sur un processeur . . . . .	14
6.2	Ordonnancement sur $m$ processeurs . . . . .	14
7	Algorithmes randomisés . . . . .	17
7.1	Sur le problème MAXIMUM SATISFAISABILITÉ . . . . .	17
7.2	Sur le problème COUVERTURE D'ENSEMBLES PONDÉRÉS . . . . .	17
8	Bornes inférieures et ETH . . . . .	18

## Liste des Algorithmes

1	3-SAT	3
2	HALF 3-SAT	3
3	$\neg$ 3-SAT	3
4	NON EGAL SATISFAISABILITÉ (NAESAT)	3
5	EXACT COVER BY 3-SETS	4
6	VERTEX COVER	4
7	STEINER TREE	4
8	COUPE MAXIMUM (CUT)	4
9	$P  \cdot  C_{\max}$	14
10	2-PARTITION	14

# 1 Complexité

## 1.1 Quelques preuves en complexité des problèmes

### Exercice 1 Quelques preuves de NP-complétude autour de 3-SAT.

Algorithme 1 – 3-SAT

**Input:** Une formule  $\varphi(x_1, \dots, x_n)$  en 3-CNF

**Question:** Existe-t-il une affectation des variables  $(x_1, \dots, x_n)$  satisfaisant  $\varphi$  ?

Algorithme 2 – HALF 3-SAT

**Input:** Une formule  $\varphi(x_1, \dots, x_n)$  en 3-CNF

**Question:** Existe-t-il une affectation des variables  $(x_1, \dots, x_n)$  satisfaisant  $\varphi$  à 50% ?

Algorithme 3 –  $\neg$ 3-SAT

**Input:** Une formule  $\varphi(x_1, \dots, x_n)$  en 3-CNF

**Question:** Existe-t-il une affectation des variables  $(x_1, \dots, x_n)$  qui ne satisfait pas  $\varphi$  ?

1. Montrer que  $\neg$ 3-SAT appartient à la classe  $P$ .
2. Montrer que HALF 3-SAT est NP-complet. Que dire du problème HALF 3-SAT dans le cas où le nombre de clauses satisfaites est au moins de 50% ?

### Solution.

1. On rappelle que tous les littéraux sont positifs, il suffit alors de tout mettre à faux pour trouver une solution, donc le problème appartient à la classe  $P$ .
2. On fait une réduction de 3-SAT vers HALF 3-SAT.  
On commence par faire la chose suivante :

$$I \rightsquigarrow I + \underbrace{(x \vee y \vee z)}_{m \text{ copies}}, \quad x, y, z \notin I$$

Si on a oui à 3-SAT alors on a  $m$  clauses satisfaites. On en déduit que sur  $2m$  clauses, il suffit de mettre  $x, y, z$  à faux et alors on a bien 50% des clauses qui sont satisfaites par la solution à 3-SAT.

Dans l'autre sens, si on a une solution à HALF 3-SAT on a plusieurs cas :

- Premier cas, on satisfait une clause dans  $I$ . Alors toutes les  $m$  clauses sont validées dans  $I$  et on a une solution à 3-SAT.
- Second cas, on ne satisfait aucune clause de  $I$ . Mais alors si dans  $I$  il n'y a aucune variable négative, on peut résoudre 3-SAT en mettant tout à positif, de même dans le cas où il n'y a aucune variable positive. Il y a donc forcément une variable présente de manière positive et négative dans  $I$ . Alors, au moins une clause est satisfaite. Donc on est dans le premier cas et forcément les  $m$  clauses satisfaites sont dans  $I$ .

Le problème de au moins 50% est facile. Il suffit de prendre une affectation aléatoire (ou son complémentaire).

### Exercice 2 Autour de Satisfaisabilité.

Algorithme 4 – NON EGAL SATISFAISABILITÉ (NAESAT)

**Input:** Une formule disjonctive  $\varphi$  sur  $n$  variables et  $m$  clauses

**Question:** Existe-t-il une affectation de valeurs de vérité aux variables qui satisfasse  $\varphi$  tel que chaque clause a un littéral vrai et un littéral faux ?

Montrer que NON EGAL SATISFAISABILITÉ est  $\mathcal{NP}$ -complet. La preuve se fera à partir de SATISFAISABILITÉ.

**Solution.**

## 1.2 Quelques problèmes dans les graphes

### Exercice 3 Quelques preuves de NP-complétude pour Steiner tree.

Algorithme 5 – EXACT COVER BY 3-SETS

**Input:** Un univers  $X$ , une collection  $C$  de triplés de  $X$

**Question:** Trouver une collection  $C' \subset C$  telle que chaque élément de  $X$  apparait exactement une fois dans les triplés de  $C'$

Algorithme 6 – VERTEX COVER

**Input:** Un graphe  $G = (V, E)$ , un entier  $k$

**Question:** Trouver  $V' \subset V$  telle que chaque arête est couverte par un sommet de  $V'$  avec  $|V'| = k$

Algorithme 7 – STEINER TREE

**Input:** Un graphe  $G = (V, E)$ , une fonction de poids  $w$  sur les arêtes, un ensemble de terminaux  $X \subset V$ , un entier  $k$

**Question:** Trouver  $T \subset E$  tel que la somme des poids des arêtes de  $T$  soit au plus de  $k$ ,  $G[T]$  est connexe et  $X \subset V(G[T])$

1. Montrer que STEINER TREE est NP-complet. Procéder à une réduction à partir de EXACT COVER BY 3-SETS.
2. Montrer que STEINER TREE est NP-complet par une réduction à partir de VERTEX COVER.

**Solution.**

### Exercice 4 Autour de Coupe maximum.

Algorithme 8 – COUPE MAXIMUM (CUT)

**Input:** Soit  $G = (V, E)$  un graphe non orienté et  $k \in \mathbb{N}$ .

**Question:** Existe-t-il une partition des sommets en deux sous-ensembles  $V_1$  et  $V_2$  tels que le nombre d'arêtes entre  $V_1$  et  $V_2$  soit  $k$ ?

Réduire NON EGAL 3-SAT à COUPE MAXIMUM. Conclure. *Remarque* : vous verrez en master que coupe min est polynomiale même si les arêtes ont des poids.

**Solution.**

### Exercice 5 title.

**Solution.**

### Exercice 6 title.



Exercice 11 title.

Solution.

#### 1.4 Rappels en complexité

Exercice 12 title.

Solution.

## 2 Algorithmes d'approximation

### 2.1 La classe Log-APX

Exercice 13 title.

Solution.

### 2.2 La classe APX

Exercice 14 title.

Solution.

Exercice 15 title.

Solution.

Exercice 16 title.

Solution.

Exercice 17 title.

Solution.

Exercice 18 title.

Solution.

Exercice 19 title.

Solution.

Exercice 20 title.

Solution.

Exercice 21 title.

Solution.

Exercice 22 title.

■  
■ Solution.

■ Exercice 23 title.

■ Solution.

■ Exercice 24 title.

■ Solution.

■ Exercice 25 title.

■ Solution.

■ Exercice 26 title.

■ Solution.

■ Exercice 27 title.

■ Solution.

■ Exercice 28 title.

■ Solution.

■ Exercice 29 title.

■ Solution.

## 2.3 Mesure différentielle

■ Exercice 30 title.

■ Solution.

■ Exercice 31 title.

■ Solution.

■ Exercice 32 title.



Solution.

## 2.4 Construction d'un FPTAS

Exercice 33 title.

Solution.

Exercice 34 title.

Solution.

## 2.5 Polynomial-Time Asymptotic Scheme : PTAS

Exercice 35 title.

Solution.

Exercice 36 title.

Solution.

## 2.6 Points extrêmes

**Exercice 37 Solutions semi-intégrales pour le problème de vertex cover.**

Par définition, une solution réalisable  $x$  est appelée semi-intégrale si les valeurs appartiennent à l'ensemble  $\{0, \frac{1}{2}, 1\}$ .

1. Donner la formulation du problème de VERTEX COVER par un programme linéaire en nombres entiers

Solution.

Exercice 38 title.

Solution.

Exercice 39 title.


Solution.

## 2.7 FPTAS et programmation dynamique

Exercice 40 title.

 **Solution.**

## 2.8 Schéma primal-dual

 **Exercice 41 title.**

 **Solution.**

## 3 Inapproximabilité ou seuil d'approximation

### 3.1 Seuil d'approximation

Exercice 42 title.

Solution.

Exercice 43 title.

Solution.

Exercice 44 title.

Solution.

### 3.2 Utilisation du principe Gap-réduction

Exercice 45 title.

Solution.

Exercice 46 title.

Solution.

Exercice 47 title.

Solution.

Exercice 48 title.

Solution.

Exercice 49 title.

Solution.

## 4 Méthodes exactes

### 4.1 Programmation dynamique

Exercice 50 title.

Solution.

Exercice 51 title.

Solution.

### 4.2 Arbres de branchement

Exercice 52 title.

Solution.

Exercice 53 title.

Solution.

Exercice 54 title.

Solution.

Exercice 55 title.

Solution.

## 5 Réductions divers

### 5.1 $L$ -réduction

Exercice 56 title.

Solution.

Exercice 57 title.

Solution.

## 6 Quelques problèmes d'ordonnancement

### 6.1 Ordonnancement sur un processeur

**Exercice 58** title.

**Solution.**

### 6.2 Ordonnancement sur $m$ processeurs

**Exercice 59 Problème d'ordonnancement sans contrainte de précédence.**

On pose  $P| \cdot |C_{\max}$  définie de la manière suivante :

Algorithme 9 –  $P| \cdot |C_{\max}$

**Input:**  $n$  tâches de durées  $p_1, \dots, p_n$  indépendantes

**Question:** Ordonnancer ces tâches sur  $m$  machines identiques en une durée totale minimale notée  $C_{\max}$ .

Par la suite on va utiliser un ordonnancement par liste. Le principe est le suivant :

- On construit une liste de priorité de tâches.
  - A chaque étape la première machine disponible est sélectionnée pour exécuter la première tâche de la liste.
1. Montrer que le problème est  $\mathcal{NP}$ -complet même pour deux machines.
  2. Pour n'importe quel ordonnancement de liste  $LS$  on a  $\frac{C_{\max}^{LS}}{C_{\max}^*} \leq 2$ . Montrer que la borne supérieure est atteinte.
  3. Nous considérons le nouvel algorithme dont le principe est le suivant :
    - On construit une liste de priorité de tâches dans l'ordre décroissant.
    - A chaque étape la première machine disponible est sélectionnée pour exécuter la première tâche de la liste.

Pour n'importe quel ordonnancement de liste on a  $\frac{C_{\max}^{LPT}}{C_{\max}^*} \leq \frac{4}{3} - \frac{1}{3m}$ .

4. Un schéma d'approximation polynomiale pour le problème  $P| \cdot |C_{\max}$

**Solution.**

1. On va faire une réduction du problème de 2-PARTITION vers  $P| \cdot |C_{\max}$ . On rappelle l'énoncé du problème 2-PARTITION :

Algorithme 10 – 2-PARTITION

**Input:** Un ensemble de  $n$  objets  $a_i$  de poids  $s(a_i)$  de somme  $2p$

**Question:** Est-il possible de trouver une partition en deux sous-ensemble de poids total  $p$

Dans le problème de 2-PARTITION, on a

$$\sum_{i=1}^n s(a_i) = 2p$$

On pose

$$s(a_i) = p_i \quad \text{et} \quad w = \sum_{i=1}^n p_i$$

Montrons que si il est possible de partager les poids en deux sous-ensembles de même poids alors il existera une distribution des tâches pour le problème  $P| \cdot |C_{\max}$  telle que

$$C_{\max} \leq T \leq \frac{w}{2}$$

Si on peut partager les poids en deux sous-ensembles  $P_1, P_2$  alors il existe  $S$  tel que

$$\text{Load}(M_1) = \sum_{i \in S} P_i = \sum_{a_i \in P_1} s(a_i) = p$$

de même pour l'autre machine. Alors on a bien trouvé une solution.

Pour le sens indirect, soit  $C$  une distribution telle que

$$C_{\max} \leq \frac{w}{2}$$

Soit  $S$  un sous-ensemble de travaux de sorte que  $S \subseteq \{1, \dots, n\}$  et

$$\text{Load}(M_1) = \sum_{i \in S} p_i = \frac{w}{2}$$

Alors, comme pour tout  $i$  on a  $p_i = s(a_i)$ , l'ensemble des taches sur le processeur  $P_1$  forme une solution du problème de  $P \mid \cdot \mid C_{\max}$  avec une bipartition

$$\sum_{i \in P_1} s(a_i) = p$$

Les éléments restants sont dans  $P_2$  ce qui donne une solution à 2-PARTITION.

2. On peut déjà trouver deux bornes inférieures intéressantes :

$$C_{\max}^{OPT} \geq \max_{i \in I} p_i, \quad \text{et} \quad C_{\max}^{OPT} \geq \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n p_i$$

Il faut au moins la durée de la tache de la plus longue et on ne peut pas faire mieux que la répartition parfaite de toutes les taches sur tous les processeurs de manière continue.

On a

$$C_{\max} = t_j + p_j \leq \max_i p_i + t_j \leq C_{\max}^{OPT} + t_j$$

Mais de par la nature de notre algorithme, avant  $t_j$  tous les processeurs sont actifs d'où

$$C_{\max} = t_j + p_j \leq 2C_{\max}^{OPT}$$

Autre correction possible :

On a

$$C_{\max}^{OPT} \geq \frac{T_{\text{seq}}}{m}$$

et

$$C_{\max}^{OPT} \geq p_j, \quad \forall j$$

Si on considère l'agencement des taches on trouve

$$T_{\text{seq}} \geq (C_{\max} - p_j) m + p_j$$

et alors

$$\frac{T_{\text{seq}}}{m} \geq C_{\max} - p_j + \frac{p_j}{m}$$

en combinant ces deux inégalités on trouve

$$\begin{aligned}C_{\max}^{LS} &\leq \frac{T_{\text{seq}}}{m} + p_j - \frac{p_j}{m} \\&\leq \frac{T_{\text{seq}}}{m} + p_j \left(1 - \frac{1}{m}\right) \\&\leq C_{\max}^{OPT} + C_{\max}^{OPT} \left(1 - \frac{1}{m}\right) \\&\leq C_{\max}^{OPT} \left(2 - \frac{1}{m}\right) \\&\leq 2C_{\max}^{OPT}\end{aligned}$$

**Exercice 60 title.**

**Solution.**

**Exercice 61 title.**

**Solution.**

**Exercice 62 title.**

**Solution.**



## 7 Algorithmes randomisés

### 7.1 Sur le problème Maximum Satisfaisabilité

Exercice 63 title.

Solution.

### 7.2 Sur le problème Couverture d'ensembles pondérés

Exercice 64 title.

Solution.

Exercice 65 title.

Solution.

Exercice 66 title.

Solution.

Exercice 67 title.

Solution.

Exercice 68 title.

Solution.

## 8 Bornes inférieures et ETH

Exercice 69 title.

Solution.

Exercice 70 title.

Solution.

Exercice 71 title.

Solution.