Anas Neumann

Ordonnancement d'une cellule robotisée

en mission pour

BOMBARDIER

Plan

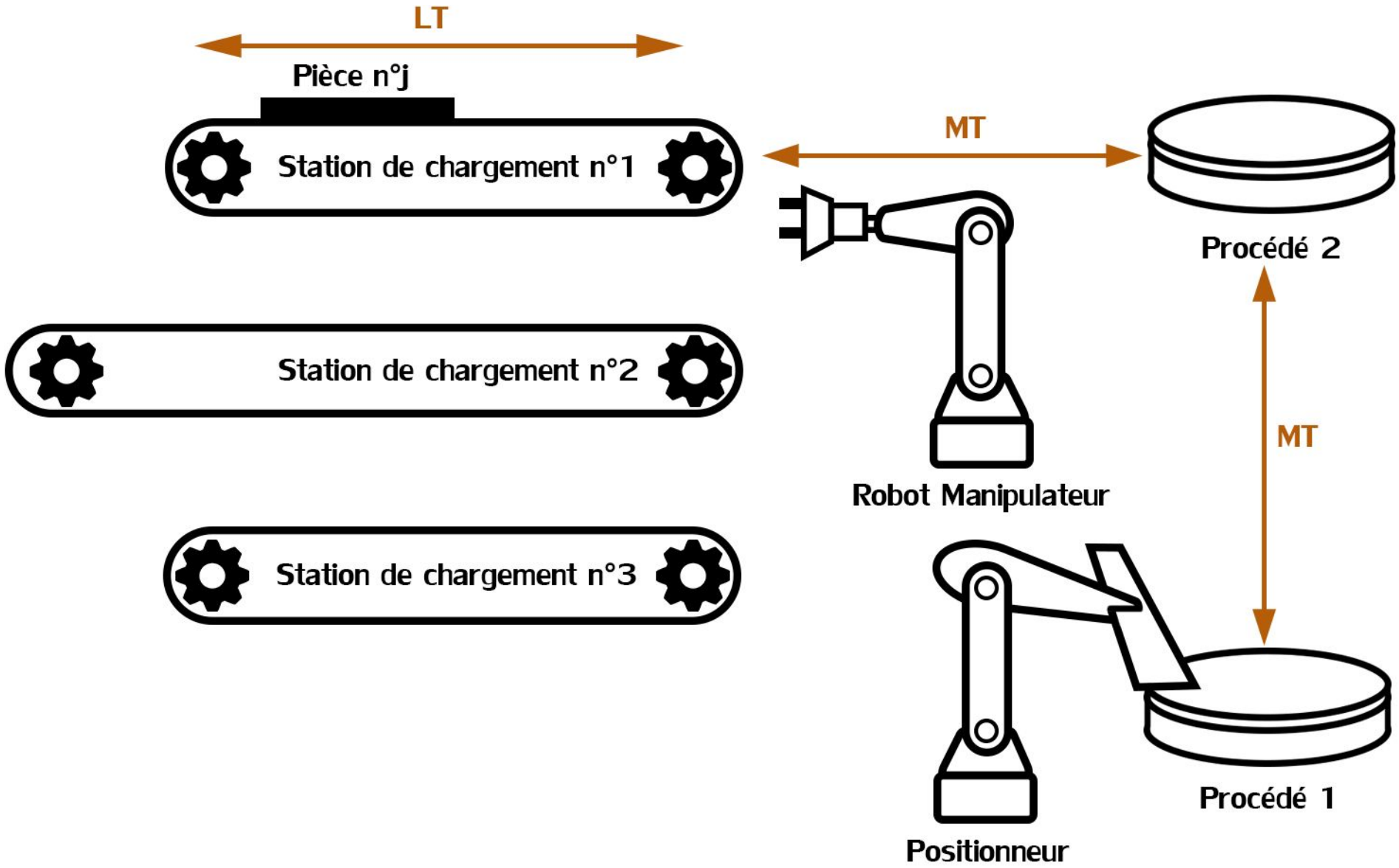
I. Présentation du problème
II. Proposition d'une méta-heuristique avec multiples améliorations
III. Implémentation dans une application temps réel
IV. Résolution par les mathématiques (modèle linéaire en nombres entiers)
V. Analyse de la qualité et des performances calculatoires
VI. Conclusion

Anas Neumann

Partie I

Présentation du problème

Partie I : présentation du problème



Anas Neumann

Partie I : Les fichiers de données

.xls(x)

# pièce	tps procédé 1	tps procédé 2	longue pièce	date due	seq. 1
#1	6,00			6,5	1
#2		5,00	1	12,1	2
#3		2,00	1	3,5	2

seq. 2	seq. 3	positionnement	tps seq. 1	tps seq. 2	tps seq. 3	loaded	status
		0,5				1	3
		0,5				2	1
		0,5				0	0

Anas Neumann

Partie II

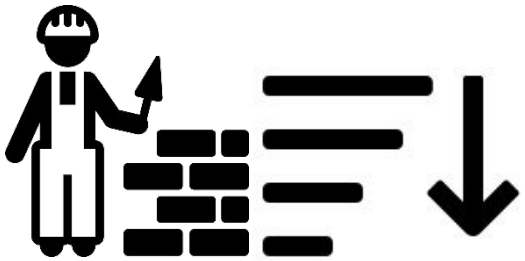
Proposition d’une méta-heuristique avec multiples améliorations

Partie II : Pseudocode

1ere phase : construction d'une solution réalisable & performante

1. Trier les pièces selon leur date due (ordre croissant).
2. Pour deux dates équivalentes, trier les pièces dans l'ordre croissant de la durée des opérations à exécuter (afin de libérer la station au plus tôt).

⇒ Il n'y aura ni parallélisme ni réalisation intercalée de deux pièces dans la solution de départ. Les pièces sont réalisées entièrement avant de passer à la suivante



TRI + CONSTRUCTION

2nd phase : permutation de l'ordre des opérations et parallélisme (amélioration n°1)

1. Pour toute opération non parallélisée, tester [*par "simulation"*] si un changement de mode réduit la valeur du retard. Si oui, effectuer ce changement de mode. Si le changement n'affecte pas le retard, favoriser le parallélisme afin de maximiser l'utilisation (et réduire le makespan).
2. S'arrêter lors que l'on a effectué tous les parallélismes possibles. Exécuter la 3eme phase uniquement si le retard n'est pas nul.

GAIN EN PARALLELISME

3eme phase : permutation de l'ordre de deux pièces consécutives (amélioration n°2)

1. Tester [*par "simulation"*] si permuter l'ordre de deux pièces consécutives permet de raccourcir le retard en augmentant les traitements parallèles (*appliquer la seconde phase sur la nouvelle solution*). Si oui, effectuer ce changement.
2. S'arrêter lors ce que l'on a testé toutes les paires consécutives de pièces ou que le retard est nul.

RECHERCHE LOCALE

Partie II : Simulation

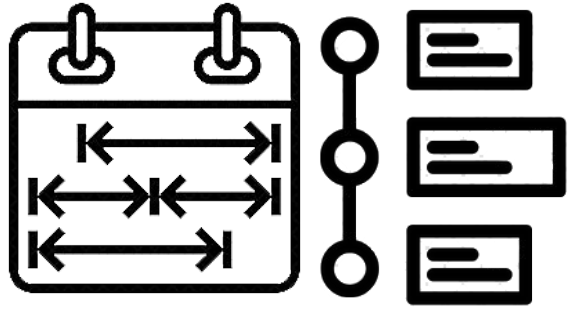
LT ← *durée de chargement/déchargement d'une pièce sur une station de chargement*
MT ← *durée d'un mouvement unique du robot*

1. date ← *durée des mouvements du robot pour sortir pièces non urgentes (MT pour une unique pièce, 3 × MT pour 2 pièces)*
2. Initialiser des stations à l'état "libre" selon les déchargements effectués (*0, LT, MT+LT* ou 3 × MT + LT)
3. **Répéter** pour chaque pièce (selon l'ordre choisi)
   a. Charger la pièce dans la 1ere station disponible possible (selon la taille de la pièce) au temps "date" + *LT*. Si la pièce est déjà chargée, ne rien faire.
   b. **Répéter** pour chaque opération
      - Exécuter au plus tôt selon la valeur de "date", la disponibilité du robot (*1* à *3* mouvements nécessaires selon le mode de la dernière opération de la précédente pièce), et la durée de mise sur le positionneur (en cas de mode B sans historique).
      - Si l'opération (de procédé 2) se fait en parallèle d'une opération en mode B, recalculer les dates de la pièce bloquée en mode B car elle pourrait devoir attendre la fin de l'opération de procédé 2 (*relancer la simulation*).

      Fin Répéter
   c. Sortir la pièce (compter les mouvements robot *1* à *4*) et libérer la station au nouveau temps "date" + *LT*.
   d. Calculer le retard pour cette pièce par soustraction avec sa "*date due*"

Fin Répéter

Retourner l'ordonnancement final.



SIMULATION DES PIÈCES

CIRRELT

BOMBARDIER

UNIVERSITÉ LAVAL

Anas Neumann

Partie III

Implémentation dans une application temps réel

Partie III : Architecture logicielle

User Interface

Data

GSO-7085

UI

Main

Engines

Parsing

Solver

Heuristic

Managers

Data

Model

Solution

POI

Ilog Cplex

Partie III : L'heuristique

```java
/**
 * Main method
 * @param args
 */
public static void main(String[] args) {
    Double MT = 0.3, LT = 0.2;

    Instance problem1 = ParsingFileEngine.BuildInstance("instance_3.xlsx");
    OptimalSchedulingEngineV2.getEngine().solve(problem1);
    MultiNeighborhoodSearchEngine.getEngine().solve(problem1, MT, LT);

    Instance problem2 = ParsingFileEngine.BuildInstance("instance_4_2.xlsx");
    OptimalSchedulingEngineV2.getEngine().solve(problem2);
    MultiNeighborhoodSearchEngine.getEngine().solve(problem2, MT, LT);

    Instance problem3 = ParsingFileEngine.BuildInstance("instance_dynamique.xlsx");
    OptimalSchedulingEngineV3.getEngine().solve(problem3);
    MultiNeighborhoodSearchEngine.getEngine().solve(problem3, MT, LT);

    Instance problemReel = ParsingFileEngine.BuildInstance("instanceBig2.xlsx");
    MultiNeighborhoodSearchEngine.getEngine().solve(problemReel, MT, LT);
}
```

```java
/**
 * Solve the problem
 * @param problem
 * @param MT
 * @param LT
 */
public Solution solve(Instance problem, Double MT, Double LT) {
    Long startTime = System.currentTimeMillis();
    Solution s = buildInitialSolution(problem, MT, LT);
    for(int index = 0; index < s.getJobs().size() - 1; index++) {
        if(s.computeAverageDelay().equals(0.0)) {
            displaySolution(s, startTime, System.currentTimeMillis());
            return s;
        }
        Solution newSolution = localSearch(s, index);
        if(newSolution.computeAverageDelay() <= s.computeAverageDelay()) {
            s = newSolution;
        }
    }
    displaySolution(s, startTime, System.currentTimeMillis());
    return s;
}
```

Partie III : Les phases d'amélioration


```java
/**
 * Améliorer une solution en cherchant à y intéger du parallélisme
 * @param s
 * @return
 */
public Solution amelioration(Solution s) {
    Double currentDelay = s.computeAverageDelay();
    Double newDelay = 0.0;
    for(CeduledJob j : s.getJobs()) {
        for(CeduledOperation o : j.getCeduledOperations()) {
            if(o.getMode().equals(CeduledOperation.MODE_A)) {
                o.setMode(CeduledOperation.MODE_B);
                newDelay = runSolution(s).computeAverageDelay();
                if(currentDelay < newDelay) {
                    o.setMode(CeduledOperation.MODE_A);
                } else {
                    currentDelay = newDelay;
                }
            }
        }
    }
    return runSolution(s);
}
```

```java
/**
 * chercher à intervetir deux pièces à partir d'une position
 * @param s
 * @param index
 * @return
 */
public Solution localSearch(Solution s, int index) {
    Solution neighborhood = s.clone();
    CeduledJob j1 = neighborhood.getJobs().get(index);
    CeduledJob j2 = neighborhood.getJobs().get(index + 1);
    neighborhood.getJobs().add(index, j2);
    neighborhood.getJobs().add(index + 1, j1);
    neighborhood.getJobs().remove(index + 2);
    neighborhood.getJobs().remove(index + 2);
    return amelioration(runSolution(neighborhood));
}
```

Partie III : Les systèmes de gestion


```java
/**
 * Dérouler une solution et calculer tous les temps
 * @param s
 * @return the solution with informations
 */
public Solution runSolution(Solution s) {
    StationManager m = StationManager.createManager();
    DateManager d = DateManager.createManager(s.MT);
    ParallelManager p = ParallelManager.createManager();
    removeJobs(s,d,m);
    for(CeduledJob j : s.getJobs()) {
        d.date = Math.max(m.enterStation(j, s.LT), d.date);
        runJobFromOperation(m, j, 0, d, s, p);
    }
    return s;
}
```

```java
/**
 * Un job souhaite entrer dans une station
 * @return
 */
public Double enterStation(CeduledJob job, Double LT) {
    if(!job.isRemoved() && job.getLoadingHistory() > 0) {
        job.setLoadedDate(0.0);
        job.setLoadedStation(job.getLoadingHistory()-1);
    } else {
        int station = 1;
        Double dateLoad = loadingStations.get(1);
        if(!job.isSize()) {
            for(Double s : loadingStations) {
                if(s < dateLoad) {
                    station = loadingStations.indexOf(s);
                    dateLoad = s;
                }
            }
        }
        job.setLoadedDate(dateLoad + LT);
        job.setLoadedStation(station);
    }
    return job.getLoadedDate();
}
```

Partie III : La simulation

```java
public void runJobFromOperation(StationManager m, CeduledJob j, int index, DateManager d, Solution s, ParallelManager p) {
    for(int i=index; i<j.getCeduledOperations().size(); i++) {
        CeduledOperation o = j.getCeduledOperations().get(i);
        if(!alreadyReady(j, index)) {
            d.doAMove();
        }
        if(o.getMode().equals(CeduledOperation.MODE_B)) {
            if(!alreadyReady(j, index)) {
                d.date += j.getPositionTime();
            }
            p.bloc(j, o);
        }
        if(o.getMode().equals(CeduledOperation.MODE_C) && (i == 0) && null != p.job && !j.getId().equals(p.job.getId())) {
            d.date = Math.max(j.getLoadedDate(), p.operation.getBeginDate());
            if(alreadyReady(p.job, p.job.getCeduledOperations().indexOf(p.operation))) {
                d.doAMove();
            } else {
                d.moves(2);
            }
            o.setBeginDate(d.date);
            o.setEndDate(d.date + o.getProcessingTime());
            d.date = Math.max(p.operation.getEndDate(), o.getEndDate());
            if(i >= (j.getCeduledOperations().size() - 1)) {
                m.leaveStation(j, o.getEndDate() + s.MT, j.getLoadedStation(), s.LT);
                d.date = Math.max(o.getEndDate() + (2 * s.MT), d.date);
                runJobFromOperation(m, p.job, p.job.getCeduledOperations().indexOf(p.operation)+1, d, s, p);
                p.job = null;
                p.operation = null;
                return;
            } else {
                d.moves(2);
                runJobFromOperation(m, p.job, p.job.getCeduledOperations().indexOf(p.operation)+1, d, s, p);
                p.job = null;
                p.operation = null;
            }
```

Anas Neumann

Partie IV

Modèle mathématique dynamique en nombres entiers

Partie IV : Les données du problème

Notation

- n : nombre de pièces dans une instance à résoudre
- $w = \{1,2\}$: un procédé de soudure
- $j = 1,\ldots,n$: une pièce
- $q \in \mathrm{R}^+$: une position dans une séquence d'opérations (une ou plusieurs par pièce)
- $l = \{1,2,3\}$: une station de chargement (considérées comme des machines parallèles)
- $m = \{1,2,3\}$: un mode de soudure (A,B ou C respectivement)

Partie IV : Les données du problème

Données constantes

- $t_{jq} \in \mathrm{R}^{+}$, la durée de soudure d'une opération n°q d'une pièce j
- $a_{jqw} = \{0,1\}$, vaut :
  - 1 si une pièce j doit être soudée par le procédé w durant l'opération n°q
  - 0 sinon
- $s_j = \{0,1\}$, la taille d'une pièce 1 = longue, 0 = petite ou moyenne
- $d_j \in \mathrm{R}^{+}$, la date due d'une pièce j
- $p_j \in \mathrm{R}^{+}$, le temps que prend une pièce j à être placée sur le positionneur (mode B)
- $I = \sum_{j=1}^{n} \sum_{q} (t_{jq} + p_j + 3MT + 2LT)$, *(infinity)* une borne supérieure

Partie IV : Les données du problème

- $lh_{jl} = \{0,1\}$, *(loading history)* vaut :
  - 1 si une pièce j est au départ dans la station de chargement l
  - 0 sinon
- $ph_j = \{0,1\}$, *(position history)* vaut :
  - 1 si une pièce j est au départ sur le positionneur
  - 0 sinon
- $wh_j = \{0,1\}$, *(welding history)* vaut :
  - 1 si une pièce j est au départ tenue par le robot
  - 0 sinon
- $LT \in \mathrm{R}^+$, *(loading time)* la durée de chargement ou déchargement d'un pièce sur l'une des stations.
- $MT \in \mathrm{R}^+$, *(move time)* la durée d'un mouvement du robot.

Variables de décision

- $L_{jl} = \{0,1\}$: *(Load)* vaut :
  - *1* si une pièce j sera chargée dans une station l
  - *0* sinon
- $B_{jl} \in \mathrm{R}^{+}$: *(Begin)* date d'entrée d'une pièce j dans une station l
- $M_{jqm} = \{0,1\}$, vaut :
  - *1* si une opération n°q d'une pièce j sera exécutée en mode m
  - *0* sinon
- $W_{jq} \in \mathrm{R}^{+}$: *(Weld)* date de début d'une opération n°q d'une pièce j
- $P_{ikjq} = \{0,1\}$, *(Precedes)* vaut :
  - *1* si une opération n°k d'une pièce i sera exécutée (soudée) avant une opération n°q d'une pièce j
  - *0* sinon

Partie IV : La fonction objectif

- $D_j \in \mathrm{R}^+$: *(Delay)* retard réel d'une pièce j
- $PA_{jq} = \{0,1\}$: *(Parallel Action)* vaut :
  - *1* si une opération q de type 3 d'une pièce j est exécutée en parallèle avec une en mode B.
  - *0* sinon
- $R_{jl} = \{0,1\}$: *(Remove)* vaut :
  - *1* si une pièce j sera déchargée de la station l
  - *0* sinon

Fonction objectif : $Min \quad \frac{1}{n} \times \sum_{j=1}^{n} D_j$

Partie IV : Les contraintes

Sous contraintes

$$[C_1] : P_{ikjq} + P_{jqik} = 1 \quad \forall i=1,...,n; \ \forall j=1,...,n; \ \forall k \in R^+; \ \forall q \in R^+; \ i \neq j$$

$$[C_2] : W_{jq} - end(j,q-1) - MT - 3MT * PA_{j(q-1)} \geq 0; \ \forall q \geq 2; \ \forall j = 1,...,n$$

$$[C_3] : W_{jq} - end(i,k) - 2MT + I(1 - P_{ikjq}) + IM_{ik2} \geq 0$$

$$\forall i=1,...,n; \ \forall j=1,...,n; \ \forall k \in R^+; \ \forall q \in R^+; \ i \neq j$$

$$[C_4] : W_{jq} - end(i,k) - 2MT + I(1 - P_{ikjq}) + IM_{jq3} \geq 0$$

$$\forall i=1,...,n; \ \forall j=1,...,n; \ \forall k \in R^+; \ \forall q \in R^+; \ i \neq j$$

$$[C_5] : W_{jq} - W_{ik} - (M_{ik2} \times p_i) - 2MT + I(1 - P_{ikjq}) \geq 0$$

$$\forall i=1,...,n; \ \forall j=1,...,n; \ \forall k>1; \ \forall q \in R^+; \ i \neq j$$

Partie IV : Les contraintes

$$[C_5]: W_{jq} - W_{ik} - (M_{ik2} \times p_i) - 2MT + I(1 - P_{ikjq}) \geq 0$$

$$\forall i=1,\ldots,n;\ \forall j=1,\ldots,n;\ \forall k>1;\ \forall q \in \mathrm{R}^+;\ i \neq j$$

$$W_{jq} - W_{ik} - ((M_{ik2} \times p_i) - 2MT) \times (1 - ph_i) + I(1 - P_{ikjq}) \geq 0$$

$$\forall i=1,\ldots,n;\ \forall j=1,\ldots,n;\ \forall k=1;\ \forall q \in \mathrm{R}^+;\ i \neq j$$

$$[C_6]: W_{j1} - MT - \sum_{l=1}^{3} (B_{jl} - MT \times (1 - R_{jl}) \times (ph_j + wh_j) \times lh_{jl}) \geq 0 \quad \forall j=1,\ldots,n;$$

$$[C_7]: \sum_{m=1}^{3} M_{jqm} = 1;\ \forall q \in R^+;\ \forall j = 1,\ldots,n$$

$$[C_8]: M_{jq3} = a_{jq2};\ \forall q \in R^+;\ \forall j = 1,\ldots,n$$

$$[C_9]: \sum_{l=1}^{3} L_{jl} = 1;\ \forall j = 1,\ldots,n$$

Partie IV : Les contraintes

$$[C_{10}] : L_{j2} - s_j \geq 0 \; ; \; \forall j = 1,...,n$$

$$[C_{11}] : B_{jl} - end(i,q) - 2LT - MT + prec(i,j,l) \geq 0$$
$$\forall j = 1,...,n; \; \forall i = 1,...,n; \; \forall l \in \{1,2,3\}; \; \forall q \in \mathrm{R}^+; \; i \neq j$$

$$[C_{12}] : B_{jl} - free(i,q,y,k) - 2LT - 3MT + prec(i,j,l) \geq 0$$
$$\forall y = 1,...,n; \; \forall j = 1,...,n; \; \forall i = 1,...,n; \; \forall l \in \{1,2,3\}; \; \forall k \in \mathrm{R}^+;$$
$$y \neq j \quad i \neq y \quad i \neq j$$

$$[C_{13}] : D_j \geq 0 \quad \forall j = 1,...,n$$

$$[C_{14}] : D_j - end(j,q) - LT - MT + d_j \geq 0 \quad \forall j = 1,...,n;$$

$$[C_{15}] : D_j - free(j,q,i,k) - LT - 3MT + d_j \geq 0 \quad \forall i=1,...,n; \; \forall j=1,...,n; \; \forall k \in \mathrm{R}^+; \; i \neq j$$

Partie IV : Les contraintes

$$[C_{16}] : W_{jq} - end(i,k) - 2MT + I(1 - P_{ikjq}) + IPA_{jq} \geq 0$$
$$\forall i=1,...,n;\ \forall j=1,...,n;\ \forall k \in R^{+};\ \forall q \in R^{+};\ i \neq j$$

$$[C_{17}] : a_{jq2} - PA_{jq} \geq 0;\ \forall q \in R^{+};\ \forall j = 1,...,n$$

$$[C_{18}] : B_{jl'} - \sum_{l=1}^{3} R_{jl}\ (2LT + MT \times wh_j + 3MT \times ph_j) + I(1 - L_{jl'}) \geq 0$$
$$\forall j = 1,...,n;\ \forall l' = 1,2,3;$$

$$[C_{19}] : B_{jl} - lh_{il}\ (2LT + MT \times wh_i + 3MT \times ph_i) + I(1 - L_{jl}) \geq 0$$
$$\forall j = 1,...,n; \forall i = 1,...,n;\ \forall l \in \{1,2,3\};\ i \neq j$$

$$[C_{20}] : R_{jl} + I(1 - lh_{jl}) + I(1 - P_{i1j1}) + I(1 - L_{il}) \geq 1$$
$$\forall j = 1,...,n; \forall i = 1,...,n;\ \forall l \in \{1,2,3\};\ i \neq j$$

$$[C_{21}] : W_{j1} - \sum_{i=1}^{n} \sum_{l=1}^{3} R_{il}\ (MT \times wh_i + 2MT \times ph_i) \geq 0\ \ \forall j = 1,...,n;$$

Partie IV : Les variables combinées

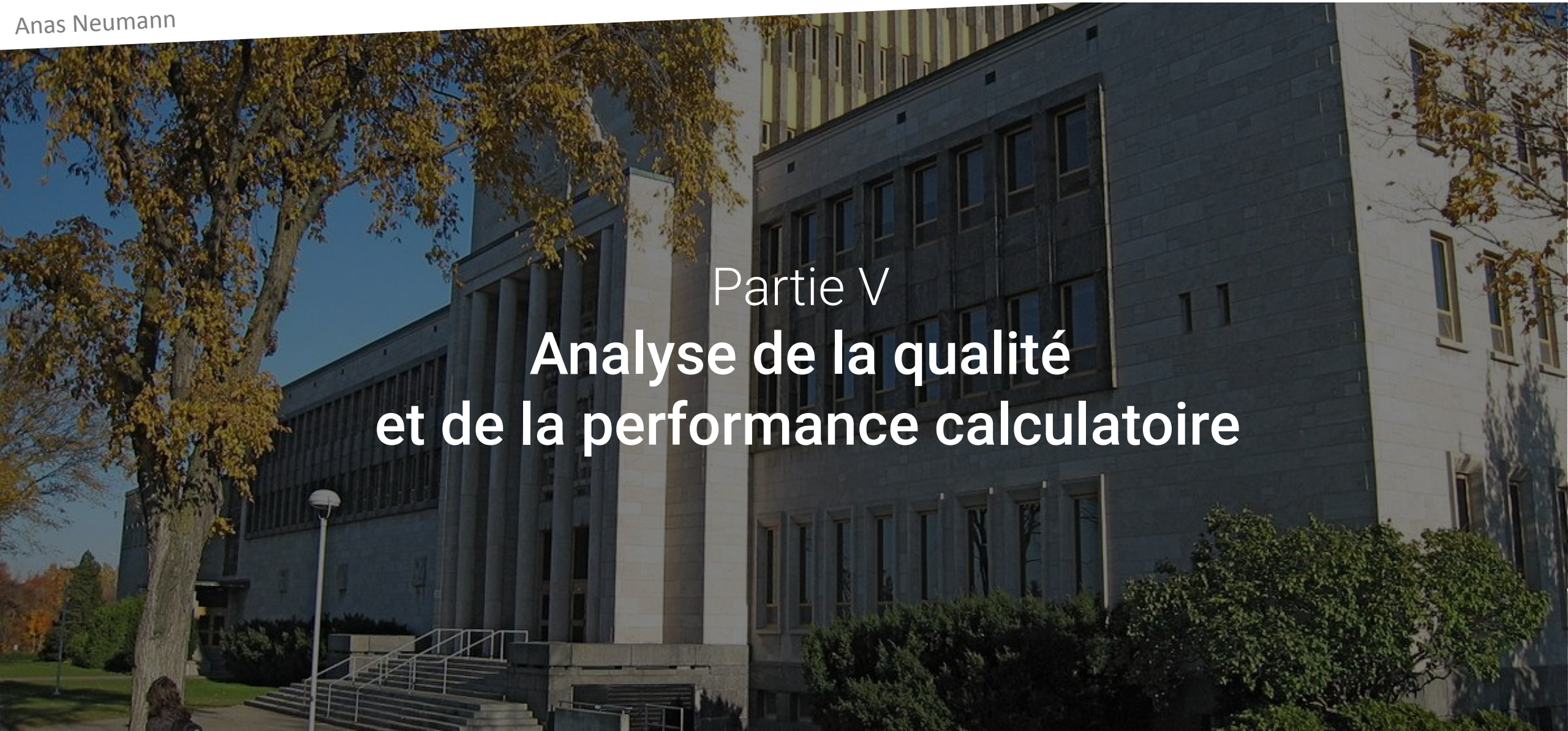
- $prec(i,j,l) = I(1 - P_{i1j1}) + I(1 - L_{il}) + I(1 - L_{jl})$
- $end(j,q) =$
  - **Si** $q > 1 : W_{jq} + t_{jq} + (M_{jq2} \times p_j)$
  - **Sinon** : $W_{jq} + t_{jq} + (M_{jq2} \times p_j) \times (1 - ph_j)$
- $free(j,q,i,k) =$
  - **Si** $n=2 : end(i,k) - I(1 - P_{jqik}) - I(1 - M_{jq2}) - I(1 - M_{ik3})$
  - **Sinon** : $end(i,k) - I(1 - P_{jqik}) - I(1 - M_{jq2}) - I(1 - M_{ik3}) - I(1 - PA_{ik}) - \sum_{y=1}^{n} \sum_{v} I \times a_{yv1} \times (P_{jqyv} + P_{yvik} - P_{jqik}) \quad y \neq j; \quad y \neq i$

Partie IV : Résolution avec Cplex


```java
/**
 * Solve the problem with Cplex
 *
 * @param problem
 */
public void solve(Instance problem) {
    try {
        IloCplex cplex = new IloCplex();
        Model m = new Model(problem, true);
        createVariables(cplex, m);
        createObjectifFunction(cplex, m);
        createConstraints(cplex, m);
        cplex.exportModel("lpex1.lp");
        if (cplex.solve()) {
            displayResult(cplex, m);
        }
        cplex.end();
    } catch (IloException e) {
        e.printStackTrace();
    }
}
```

```java
private void createVariables(IloCplex cplex, Model m) throws IloException {
    String[] namesDelay = new String[m.nbrJobs];
    for (int j = 0; j < m.nbrJobs; j++) {
        namesDelay[j] = "D" + j;
        Integer nbrOpJ = m.jobs.get(j).getOperations().size();
        String[] namesLoads = new String[m.nbrLoadStations];
        String[] namesBegin = new String[m.nbrLoadStations];
        String[] namesRemove = new String[m.nbrLoadStations];
        String[] namesWeld = new String[nbrOpJ];
        String[] namesParallel = new String[nbrOpJ];
        m.varMode[j] = new IloIntVar[nbrOpJ][m.nbrModes];
        m.varPrecedence[j] = new IloIntVar[nbrOpJ][m.nbrJobs][];
        for (int q = 0; q < nbrOpJ; q++) {
            namesWeld[q] = "W(" + j + "," + q + ")";
            namesParallel[q] = "PA(" + j + "," + q + ")";
            String[] namesModes = new String[m.nbrModes];
            for (int o = 0; o < m.nbrModes; o++) {
                namesModes[o] = "M(" + j + "," + q + "," + o + ")";
            }
            for (int i = 0; i < m.nbrJobs; i++) {
                Integer nbrOpI = m.jobs.get(i).getOperations().size();
                String[] namesPrecedences = new String[nbrOpI];
                for (int k = 0; k < nbrOpI; k++) {
                    namesPrecedences[k] = "P(" + j + "," + q + "," + i + "," + k + ")";
                }
                m.varPrecedence[j][q][i] = cplex.boolVarArray(nbrOpI, namesPrecedences);
            }
            m.varMode[j][q] = cplex.boolVarArray(m.nbrModes, namesModes);
        }
```

Anas Neumann



Partie V

Analyse de la qualité et de la performance calculatoire

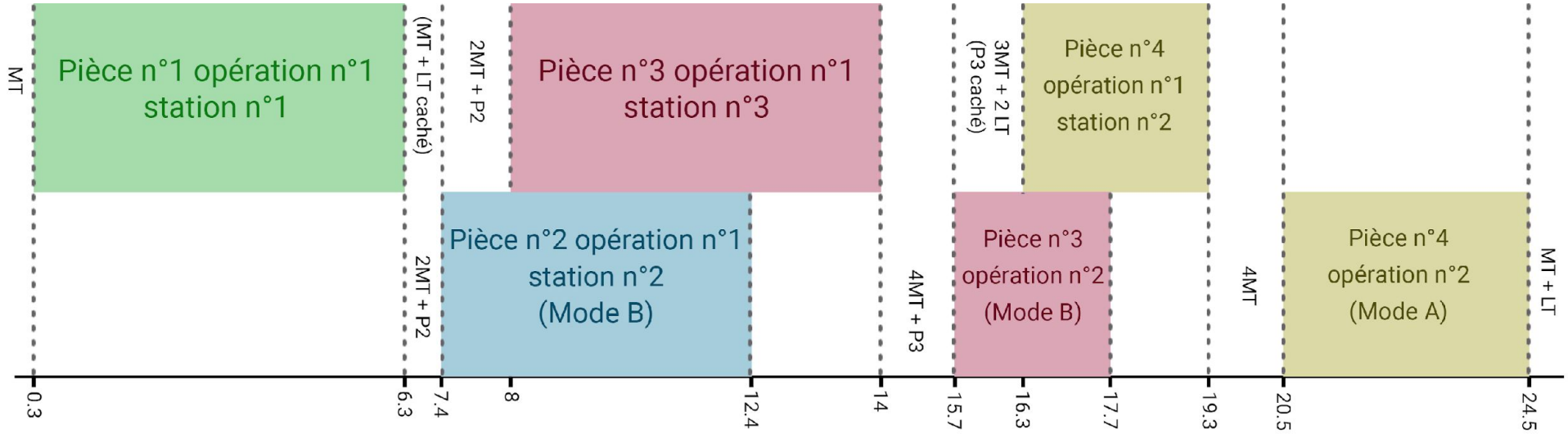
Partie V : instance n°1

Pièce	Durée procédé 1	Durée procédé 2	Pièce longue ?	Date due	Opération n°1	Opération n°2	Temps de positionnement
#1		6.00		7.90	2		0.5
#2	5.00	2.00	1(oui)	10.80	1	2	0.5
#3	1.50		1(oui)	13.30	1		0.5

Partie V : instance n°2

Pièce	Durée procédé 1	Durée procédé 2	Pièce longue ?	Date due	Opération n°1	Opération n°2	Temps de positionnement
#1		6.00		6.80	2		0.5
#2	5.00		1(oui)	15.10	1		0.5
#3	2.00	6.00		20.40	2	1	0.5
#4	4.00	3.00	1(oui)	25	2	1	0.5

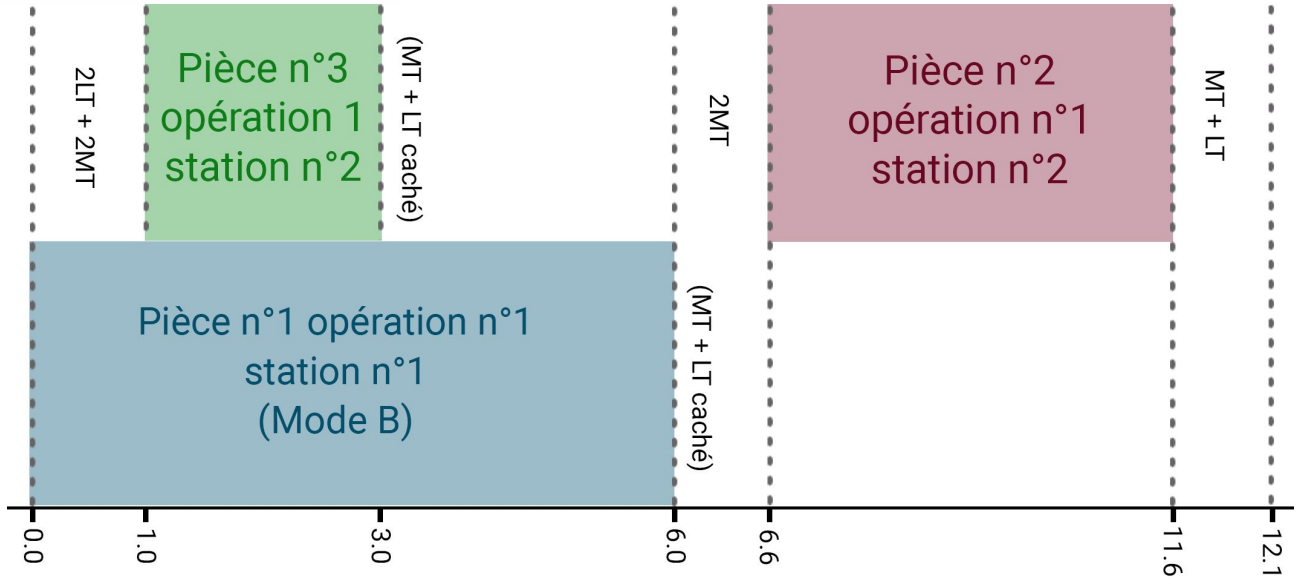
1ere AMÉLIORATION



Partie V : instance n°3

Id	Durée opération restante	type d'opération	date due	Pièce longue ?	tps positionnement	station bloquée	status
# 1	6.00	1	06.50	non	0.50	1	3
# 2	5.00	2	12.10	oui	0.50	2	1
# 3	2.00	2	03.50	oui	0.50	-	0

2nd AMÉLIORATION + DÉCHARGEMENT



Partie V : instance réelle

Nombre de pièces : **162**

Nombre d'opérations : **196**

- **1 010 000 000** instructions <u>environ</u> pour l'heuristique
  (196x196x162x162 + 162x162x196 + 162x196 + 162 + 196)
  = résolu en **0.99 secondes !**

TEMPS REEL

- **196!** instructions <u>environ</u> pour le modèle mathématique
  (incalculable et incomparablement plus grand)

[13! Dépassant déjà le 6 x nombre d'opérations de l'heuristique]

Partie VI
Conclusion

Partie VI : Conclusion

Objectifs

- Déviation nulle dans la grande majorité des cas.
- Temps réel même avec un volume de données relativement grand.
- Complexité polynomiale O(m4).
- Application maintenable (organisée, taille réduite) et heuristique évolutive.

Améliorations

- Déviation en cas de possibilité d'enchaînement de parallélisme.
- Voisinage parfois pas assez grand (phase n°2).
- Heuristique très spécifique dans l'état actuel.

Merci de votre attention !