

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



Faculté du Génie Electrique Et D'informatique  
Département d'Automatique

**Mémoire de Fin d'Etude**

En vue de l'obtention du diplôme

*Master académique en automatique*  
*Option commande des systèmes*

**Thème**

**Conduite des systèmes à événements discrets en  
minimisant l'énergie consommée**

Présenté par :

**Dali Souad**  
**Chebil Lydia**

Encadré par :

**Mr KARA Redouane**

**Jury de soutenance :**

Président : Mr A. MAIDI  
Encadreur : Mr R. KARA  
Examineur 1: Mr M. ABDENNOUR  
Examineur 2: Mme A. NAIT ABDESSELAM

**Promotion :  
juillet 2017**

# *Remerciements*

*Au terme de ce travail,*

*Nous tenons, en premier lieu à remercier le bon Dieu de nous avoir donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.*

*En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Mr KARA Redouane, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.*

*Nous tenons également, à lui exprimer notre profonde reconnaissance pour sa disponibilité, le temps précieux qu'il nous a consacré ainsi que ses encouragements.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## *Dédicaces*



*Du profond de  
mon cœur je dédie ce modeste travail :*

*A mes chers parents*

*Pour tous les efforts et les sacrifices que  
vous n'avez jamais cessé de consentir pour  
mon instruction et mon bien-être.*

*A mes frères et mes sœurs :*

*Samir, Aghiles, Sofiane, Amel et Cylia*

*A tous mes amis*

*Veillez trouver dans ce modeste travail  
l'expression de mon affection la plus sincère.*

*Lydia*

## *Dédicaces*



*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes chers parents :*

*Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.*

*Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.*

*Que dieu vous protège et vous garde pour nous*

*A ma chère sœur Sara, à mes chers frères Mohammed et Alilou*

*A la mémoire de mes grands parents paternels*

*A mes chers grands parents maternels*

*A mes oncles, tantes, leurs époux et épouses à mes cousins et cousines, Thelali, Amina, spécialement khaltou Naïma et ses enfants sans oublier ma chère cousine Souad*

*A mes chers amis de toujours : Lydia, Tarik, Sid Ahmed, Djamila, en souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.*

*A tous les étudiants de la promotion 2016/2017, Option : commande des systèmes, spécialement ma chère Katia Dahbi.*

*A toute personne qui m'aime et que j'aime*

*Souad*

## Table des matières

---

### Remerciement

### Introduction générale

### Chapitre I : Généralités

I. Introduction .....	1
II. Les systèmes temps réel .....	1
II.1.Définition d'un système temps réel .....	2
II.2.Classe des systèmes temps réels .....	3
II.2.1-Temps réel dur ou à contraintes strictes (Hard Real Time) : .....	3
II.2.2-Temps réel souple ou à contraintes relatives (soft real-time) : .....	4
II.2.3.Tempsréelferme (firm real time.....	4
II.3. Caractéristiques communes des applications temps-réel .....	5
II.4. Exemples d'applications temps réel .....	5
II.5.Les contraintes .....	7
II.5.1.Les contraintes temporelles .....	7
II.5.2.Les contraintes de ressources .....	7
II.6. Les tâches en temps réel .....	7
II.6.1.Définition d'une tâche : .....	8
II.6.2.Caractéristiques d'une tâche .....	8
II.6.3.Modélisation des tâches .....	9
II.6.3.1.Tâches périodiques : .....	9
II.6.3.2.Tâches apériodiques .....	10
II.6.3.3.Tâches sporadiques .....	11
II.7.Respect des échéances temporelles : ordonnancement.....	12
II.7.1.Les ressources .....	12
II.7.2.Quelques définitions .....	13
II.7.3.Problème d'ordonnancement .....	13
II.7.4.Types d'ordonnements : .....	14
II.7.4.1.Ordonnement hors-ligne (off-line scheduling): .....	14
II.7.4.2.Ordonnement en ligne (on-line scheduling) .....	15
II.7.4.3.Ordonnement préemptif .....	15
II.7.4.4.Ordonnement non préemptif : .....	15
II.7.4.5.Ordonnement statique/dynamique .....	16

II.6.4.6.Ordonnancement optimal/ non-optimal .....	16
II.6.5.Les objectifs d'ordonnancement .....	16
III. Les systèmes de transport .....	17
III.1.Définition d'un système de transport .....	17
III.2.Généralités sur les systèmes de transport .....	17
III.2.1.Système physique .....	17
III.2.1.1.L'infrastructure .....	18
III.2.1.2.Entités de transport .....	19
III.2.2.Système de gestion .....	20
III.3.Les types de transport .....	21
III.3.1.Transport terrestres .....	21
III.3.2. Transport aériens .....	21
III.3.3. Transport maritimes .....	21
III.4.Système de transport vu en tant que un Systèmes à Événements Discrets .....	22
IV. Réseau de Petri.....	22
IV.1.Elément de base d'un réseau de Petri .....	23
IV.2.Marquage des places .....	24
IV.3.Franchissement de transition .....	25
IV.4.Séquences de franchissement .....	26
IV.5.Quelque réseau de pétri particuliers .....	26
IV.5.1. Graphe d'états .....	27
IV.5.2.RdP synchronisé .....	27
IV.5.3. Graphe d'événements .....	28
IV.5.4. RdP temporisés .....	28
IV.5.4. 1.Les réseaux de Petri T-temporisés .....	28
IV.5.4. 2.Les réseaux de Petri P-temporisés .....	29
IV.6.Graphe d'événements temporisés .....	29
IV.6.1.Définition : .....	29
IV.6.2.Propriétés des graphes d'événements temporisés .....	30
IV.7. Représentation de la dynamique .....	30
IV.7.1.Fonctions dateurs et fonctions compteurs .....	31
IV.7.2.Fonction dateurs .....	31
V. Conclusion : .....	33

---

## **Chapitre II : minimisation d'énergie dans un système de transport**

I. Introduction .....	34
II. Le microprocesseur .....	34
III. Qu'est ce que la puissance ? l'énergie ? .....	35
IV. Consommation énergétique d'un processeur .....	36
IV.1.Rappels sur le transistor CMOS .....	37
IV.2. La consommation dynamique .....	39
IV.2.1 Courant de court-circuit : .....	39
IV.2.2.Courant de commutation .....	40
IV.3.Consommation statique .....	42
IV.4.La puissance totale .....	43
IV.5.Technique de réduction de la consommation énergétique : .....	44
IV.5.1.Au niveau technologique (consommation dynamique et statique) .....	44
IV.5.2.Techniques matérielles .....	46
IV.5.3.Techniques logicielles .....	46
IV.5.4.Technique hybrides .....	47
IV.5.5.Technique dynamique de la tension : (Dynamique Voltage Scaling) .....	47
IV.5.6.Algorithmes génétique .....	47
IV.5.6.1.Operateurs génétiques .....	48
V. La réduction de la consommation d'énergie d'un processeur : .....	49
V.1.Fonction de consommation énergétique (fonction objectif) .....	51
V.2.Développement du problème .....	54
V.3.Programme sous Matlab .....	55
V.3.1.Résultats de simulation .....	56
V.3.2.Interprétation des résultats de simulation .....	57
VI. Conclusion .....	58

---

## **Chapitre III : Application sur la minimisation d'énergie d'un système de transport**

I. Introduction .....	59
II. Nature des énergies utilisant dans les transports .....	59

III. Transformations de l'énergie dans un moyen de transport .....	60
IV. Source de consommation énergétique d'un moyen de transport .....	61
IV.1. Les paramètres relatifs au moyen de transport : .....	61
IV.2. L'ensemble des facteurs liés aux conditions d'exploitation opérationnelle d'un moyen de transport.....	61
IV.3. Le conducteur .....	62
V. Solutions pour faire des économies d'énergie dans les transports .....	62
V.1. Réduire la consommation du moteur .....	63
V.2. Développer les véhicules hybrides et électriques.....	63
V.3. Utiliser l'énergie présente dans le liquide de refroidissement et l'énergie des gaz d'échappement .....	63
V.4. Réduire la consommation de tous les accessoires .....	64
V.5. Réduire la résistance au roulement.....	64
V.6. Réduire la traînée aérodynamique .....	64
V.7. Réduire le poids d'un moyen de transport .....	64
V.8. Récupération de l'énergie .....	64
V.9. Des systèmes embarqués d'aide à la conduite (systèmes régulateurs de vitesse, systèmes de freinage, etc .....	65
V.10. Éco-conduite.....	65
VI. Quelques rappels : .....	65
VI.1. Puissance .....	66
VI.2. Énergie .....	66
VI.2.1. L'énergie potentielle gravitationnelle .....	67
VI.2.2. L'énergie cinétique .....	67
VI.2.2.1. Variation de l'énergie cinétique.....	67
VI.2.2.2. Conservation de l'énergie cinétique .....	68
VI.2.3. L'énergie mécanique .....	68
VI.2.3.1. Conservation de l'énergie mécanique .....	68
VI.3. Mouvement translation rectiligne .....	68
VI.4. Translation rectiligne accélérée ou décélérée .....	69
VI.5. Phases d'un mouvement : .....	70
VI.6. Relation de Newton entre force et accélération .....	70
VII. Modélisation des réseaux de transport .....	71
VII.1. Description du système de transport étudié .....	71

VII.2. Objectif .....	72
VII.3. Formulation du problème .....	72
VII.4. Modélisation de système de transport par réseaux de Petri .....	74
VII.4.1.1 <sup>er</sup> application (une seule ligne) .....	74
VII.4.1.1. Modélisation .....	74
VII.4.1.2. Les équations d'état .....	74
VII.4.1.3. Fonction de consommation énergétique (fonction objectif) .....	75
VII.4.2.2 <sup>ème</sup> application : (deux lignes) .....	76
VII.4.2.1. Les équations d'état .....	76
VII.4.2.2. Fonction de consommation énergétique (fonction objectif) .....	77
VIII. Programmation sous Matlab .....	79
VIII.1. Résultats de simulation.....	80
VIII.2. Interprétation des résultats : .....	81
IX. Conclusion .....	82

## **Conclusion générale**

## **Bibliographie**

## Table des figures

---

Figure I.1 : système temps réel.....	3
Figure I.2 : Système temps réel dur. ....	4
Figure I.3 : Système temps réel souple. ....	4
Figure I. 4: Système temps réel ferme.....	5
Figure I.5 : Modèle usuelle d'une tâche temps réel. ....	9
Figure I. 6 : Modèle d'une tâche périodique temps réel. ....	9
Figure I.7 : Modèle d'une tâche apériodique temps réel. ....	10
Figure I.8 : Modèle d'une tâche sporadique temps réel .....	11
Figure I.9: Exemple d'ordonnancement hors-ligne. ....	14
Figure I.10 : Exemple d'ordonnancement en ligne .....	15
Figure I.11 : Exemple d'ordonnancement préemptif. ....	15
Figure I.12 : Exemple d'ordonnancement non préemptif. ....	16
Figure I.13 : Les éléments de l'infrastructure d'un système de transport. ....	19
Figure I.14 : Exemple de réseau de Petri.....	24
Figure I.15 : Exemple de réseau de Petri marqué avec un vecteur de marquage M .....	25
Figure I.16 : franchissement d'une transition.....	26
Figure I.17 : Graphe d'états. ....	27
Figure I.18 : Un système modélisé par un RdP synchronisé.....	27
Figure I.19 : réseaux de Petri T-temporisés .....	28
Figure I.20 : réseaux de Petri P-temporisés .....	29
Figure I.21 : Exemple de graphe d'événement temporel.....	30
Figure I.22 : Un graphe d'événements temporel.....	32
Figure II. 1 : Puissance consommée en fonction de temps .....	36
Figure II. 2 : Transistor CMOS. ....	37
Figure II.3 : Un inverseur, fonction de base réalisée par des transistors CMOS .....	38
Figure II. 4 : Puissance dynamique d'une porte logique.....	39
Figure II.5 : Courant de court-circuit dans un inverseur CMOS.....	39
Figure II.6 : Courant de commutation dans un circuit CMOS .....	40
Figure II.7 : courant de fuites .....	43
Figure II.8 : Schéma simplifié du principe de fonctionnement d'un algorithme génétique.....	51
Figure III. 1 : Les différentes transformations d'énergie produites dans une voiture. ....	60

Figure III.2 : les différentes voies de la consommation d'énergie d'un moyen de transport ....	63
Figure III.3 : profil de vitesse.....	70
Figure III.4 : réseau de transport avec deux lignes de bus .....	71
Figure III. 5 : évolution de la vitesse en fonction du temps. ....	73
Figure III.6 : Graphe d'événement temporisé (GET) .....	74
Figure III.7 : le modèle de réseau de Petri des de ligne .....	76

## Liste des tableaux

---

Tableau I.1 : la signification des graphiques utilisé dans RdP .....	23
Tableau II. 1 : Dates de départs et les temps de traitements des 3 tâches après simulation.....	56
Tableau II.2 : l'évolution de $\theta(T_i)$ en diminuant $V_{ad}$ .....	56
Tableau III.1 : La variation d'accélération et le temps de traitement en fonction de la vitesse pour la tâche 1 .....	80
Tableau III.2 : la variation d'accélération et le temps de traitement en fonction de la vitesse pour la tâche 2 .....	80
Tableau III. 3 : l'évolution de l'énergie consommée en fonction de la vitesse .....	80

# Introduction générale

Du métro sans conducteur, au pilote automatique dans les avions, les systèmes temps réel font aujourd'hui partie de notre vie quotidienne. Ce monde du temps réel est si vaste que ses technologies s'appliquent à divers secteurs en commençant par le contrôle industriel, le transport, les télécommunications, les systèmes de sécurité,... etc. On désigne du temps réel, toute application mettant en œuvre un système informatique dont le comportement (fonctionnement) est conditionné par l'évolution dynamique de l'état d'un environnement (appelé procédé) qui lui est connecté et dont il doit contrôler le comportement. Le rôle du système informatique est alors de suivre ou de piloter ce procédé en respectant des contraintes temporelles définies dans le cahier des charges de l'application. On qualifie du temps réel tout système informatique dont la correction du fonctionnement ne dépend pas seulement de l'exactitude logique des résultats qu'il fournit, mais surtout dépend de la date à laquelle ces résultats sont produits. Ainsi, le système ne traite plus uniquement des valeurs, mais des couples valeur et temps. En fonction de traitement à exécuter à un instant donné, que nous appellerons des tâches, c'est le rôle de l'ordonnanceur de décider quelle tâche est exécutée sur le processeur, en fonction d'une stratégie d'ordonnement. La seule rapidité moyenne d'exécution du logiciel ne conditionne pas la validité du système, mais des contraintes temporelles doivent être respectées (par exemples les échéances des traitements) sont relatives à un temps physique mesurable, et font partie de la spécification du système à implanter.

Les Systèmes (Dynamiques) à Événements Discrets (SED) désignent des systèmes généralement de conception humaine. Leur évolution obéit à l'apparition d'événements qui ont lieu à des instants discrets. Les systèmes de production, les réseaux de transport et les systèmes informatiques sont, par exemple, des processus que l'on peut considérer comme des systèmes à événements discrets. Le comportement dynamique de cette classe de système ne peut pas être décrit par des équations différentielles ou aux différences comme dans les systèmes continu classique. L'importance prise par ces systèmes dans notre société a conduit des nombreux chercheurs à proposer des modèles mathématiques permettant de décrire leur comportement afin d'en évaluer les performances et d'optimiser leur conception ou leur pilotage. On cite par exemple les modèles à base d'automates à états finis qui servent à représenter les systèmes déterministes les plus simples, les réseaux de Petri pour des systèmes plus complexes qui comportent à la fois des phénomènes de synchronisation et de concurrence, et l'algèbre des dioides. Ces systèmes sont plus fréquents dans le domaine

industriel. En outre, les applications dans ce domaine posent un autre problème qui réside dans l'existence des contraintes temporelles dont il faut tenir compte. Ces contraintes peuvent prendre diverses formes (échéance, intervalle de temps, durée de validité,...., etc.)

Les systèmes de transport peuvent être vus comme une classe de systèmes dynamiques à événements discrets (SDED). La dynamique de cette classe est gouvernée par l'occurrence d'événements dans un espace d'état discret (par exemple l'arrivée et le départ d'un bus dans un arrêt), les systèmes de transports (ST) ont une dynamique régie par différents phénomènes dont la synchronisation, le parallélisme et la concurrence. La diversité de ces phénomènes rend l'étude des ST plus difficile et nécessite l'exploitation de plusieurs théories complémentaires permettant de décrire ces systèmes d'une façon concise.

Plusieurs questions pertinentes se posent au sujet de la gestion des systèmes de transport (ST). Les exploitants visent essentiellement à répondre à ces questions dans les meilleures conditions tout en optimisant des ressources des systèmes sous des contraintes bien définies. Pour ce faire, plusieurs études ont été menées dans ce domaine. Leur but est de proposer des améliorations qui peuvent assurer l'évolution et la rentabilité des systèmes et contribuer à l'efficacité de différents services proposés aux voyageurs.

Parmi les ST dont l'importance ne cesse d'évoluer, nous considérons les réseaux de transport terrestres. Dans ces réseaux plusieurs problématiques peuvent être envisagées. Nous nous intéressons dans ce mémoire aux points suivants :

- la consommation énergétique dans les moyens de transport et le changement de profil de vitesse ou court du trajet.
- l'amélioration de la qualité des services offerts aux usagers. Nous proposons des techniques de réduction d'énergie consommée.

La consommation d'énergie dans le monde due aux appareils électroniques devient de plus en plus importante. 20% de la consommation d'énergie à Amsterdam est utilisée par les systèmes de télécommunication. Aux Etats Unis, 9% de la consommation électrique nationale provient de l'utilisation d'internet, 13% si toutes les applications d'ordinateur sont comptées. Le transfert de 4MBytes de données sur le web consomme l'énergie générée par un kilogramme de charbon. En conséquence, la réduction de la consommation électrique des appareils électroniques aidera à réduire la consommation globale d'énergie dans la planète et

les risques associés à sa production. Pour toutes ces raisons, un fort intérêt est né chez les industriels et les universitaires pour l'étude des méthodes et des techniques de réduction de la consommation dans les circuits intégrés.

Le transport occupe aussi une place prépondérante dans les consommations d'énergie. La consommation totale d'énergie pour ce secteur est, en outre, en constante croissance : elle a presque doublé en l'espace de 25 ans [40]. Le transport routier occupe la première place en termes de consommation devant le transport aérien, ferroviaire et enfin maritime. En 2010, il représente à lui seul 85% de la consommation totale d'énergie du transport [40]. La consommation énergétique de ce type de systèmes est un problème sensible et sa réduction est devenue une nécessité.

L'objectif des travaux entrepris dans le cadre de ce Mémoire est de proposer des méthodes de gestion de l'énergie aptes à répondre à la demande d'énergie tout en respectant les différentes contraintes liées au fonctionnement de la chaîne énergétique du système et à la sécurité, afin de minimiser et d'optimiser la consommation énergétique par la source principale, permettant ainsi d'élever le niveau d'autonomie du système.

Afin de répondre aux problèmes d'optimisation il existe des algorithmes qui consistent à identifier le processeur qui conduira à la meilleure performance possible de système selon la nature des tâches à exécuter.

Les algorithmes d'optimisation utilisés pour le processus de minimisation du coût de l'implantation sous contrainte de précision sont étudiés. Nous proposons une amélioration des techniques basées sur les algorithmes génétiques. Cette amélioration, en ajoutant une complexité de calcul négligeable, permet d'augmenter significativement la qualité de la solution obtenue. Cet algorithme applique les tendances d'optimisation modernes, et un algorithme déterministe basé sur la recherche tabou. Cette approche permet de fournir de meilleurs résultats par rapport aux autres algorithmes dans toutes les applications examinées, avec une complexité de calcul raisonnable. Les algorithmes génétiques sont des algorithmes permettant de résoudre des problèmes d'optimisation non linéaires, ils sont particulièrement utilisés lorsque l'on souhaite obtenir de bonnes solutions, nécessairement optimales et assez vite.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

Le chapitre 1 présente les notions de systèmes temps réel et leurs classes. Ainsi que la théorie d'ordonnancement temps réel et ces différentes classes. Comme on a présentées quelques généralités sur les systèmes de transport en spécifiant les deux composantes qui les constituent, à savoir le système physique et le système de gestion. A la fin on a étudié des exemples sur les réseaux de Petri après quelques rappelles sur ce dernier, son fonctionnement et leurs propriétés.

Le chapitre 2 présente l'origine de la consommation énergétique dans les processeurs(les circuits CMOS) et les techniques de réduction de cette consommation, en ce basant sur les algorithmes génétiques.

Le chapitre 3 nous nous intéressons à la minimisation d'énergie dans un système de transport qu'on va modéliser par les réseaux de Petri, soumis à des contraintes temporelle.

# Chapitre I

## I. Introduction :

Sous l'appellation Systèmes à Événement Discrets (SED) sont regroupés certains systèmes, généralement de conception humaine. On peut par exemple citer les systèmes de production, les réseaux de communication et les systèmes de transport (routier, ferroviaire ou aérien).

Dans ces systèmes, l'essentiel de l'enchaînement dynamique des tâches provient de phénomènes de synchronisation et d'exclusion mutuelle ou compétition dans l'utilisation de ressources communes, ce qui nécessite une politique d'arbitrage ou de priorité, questions généralement désignées sous le terme générique d'ordonnement.

Le comportement dynamique de cette classe de système échappe totalement à la modélisation par équations différentielles ou leurs équivalents en temps discret. Pour décrire et étudier les SED, on utilise les modèles de réseaux de files d'attente, réseaux de Petri, ou automates temporisés.

Ce premier chapitre a pour objectif d'introduire les généralités et les principaux outils algébriques utilisés dans la suite de ce travail.

## II. Les systèmes temps réel :

Un système temps réel est un système dont la correction ne dépend pas uniquement du résultat logique du calcul mais également du moment auquel les résultats sont produits. Un système temps réel est donc un système qui assure que les traitements produisent des résultats conformes (fonctionnellement corrects) et au bon moment (temporellement corrects).

Généralement, un système temps réel est composé d'un ensemble de tâches exécutées en concurrence pour utiliser le (ou les) processeur et certaines ressources partagées. Le plus souvent les exigences temporelles sont reportées sur les échéances d'exécution des tâches. Par conséquent, une validation temporelle consiste à vérifier que toutes les tâches d'un système terminent leur exécution avant leurs échéances, durant toute la vie du système, et cela en examinant le pire scénario d'exécution de tâches, s'il existe un moyen de le garantir alors le système est dit ordonnançable. Le test d'ordonnançabilité est dépendant du modèle de tâches qui définit l'ensemble des restrictions aux quelles doivent se conformer les tâches et de l'algorithme d'ordonnement utilisé pour déterminer l'ordre dans lequel doivent être exécutées les tâches.

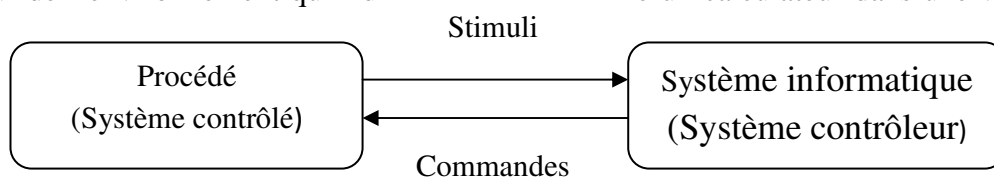
## II.1. Définition d'un système temps réel :

Un contrôleur de vitesse pour voiture, de métro sans conducteur, au pilote automatique dans les avions, les systèmes temps-réel, ou à temps contraint, sont de plus en plus utilisés dans la vie quotidienne. De plus, ils font souvent partie des applications critiques dans le domaine de l'aviation, le contrôle de processus industriels, transport ferroviaire, automobile, l'électroménager, le contrôle de centrales nucléaires, ... etc.

Les systèmes temps-réel sont en général caractérisés par des interactions complexes avec l'environnement et par des contraintes temporelles strictes dont la violation peut entraîner des conséquences graves. Par conséquent, une propriété importante de ces systèmes est leur fiabilité.

Un système temps réel est un système d'exploitation ou un ensemble d'applications informatique qui doit répondre à des stimuli fournis par un environnement externe afin de le contrôler. Donc un système temps réel n'est pas un système "qui va vite" mais un système qui satisfait des contraintes temporelles.

Dans cette définition, un système temps réel est alors composé de deux éléments distincts : une ou plusieurs entités physiques constituant le procédé « le système contrôlé » et un système de contrôle « contrôleur » qui est chargé de surveiller de manière régulière, périodique, l'état du procédé en récupérant les valeurs en provenance des capteurs. En fonction de l'algorithme de contrôle et les valeurs décrivant l'état actuel du procédé, le contrôleur commande les changements d'état, via des actionneurs. Notons qu'un système temps réel est dit embarqué lorsqu'il est situé à l'intérieur de l'environnement qu'il doit contrôler, comme un ordinateur dans une voiture ou un avion.



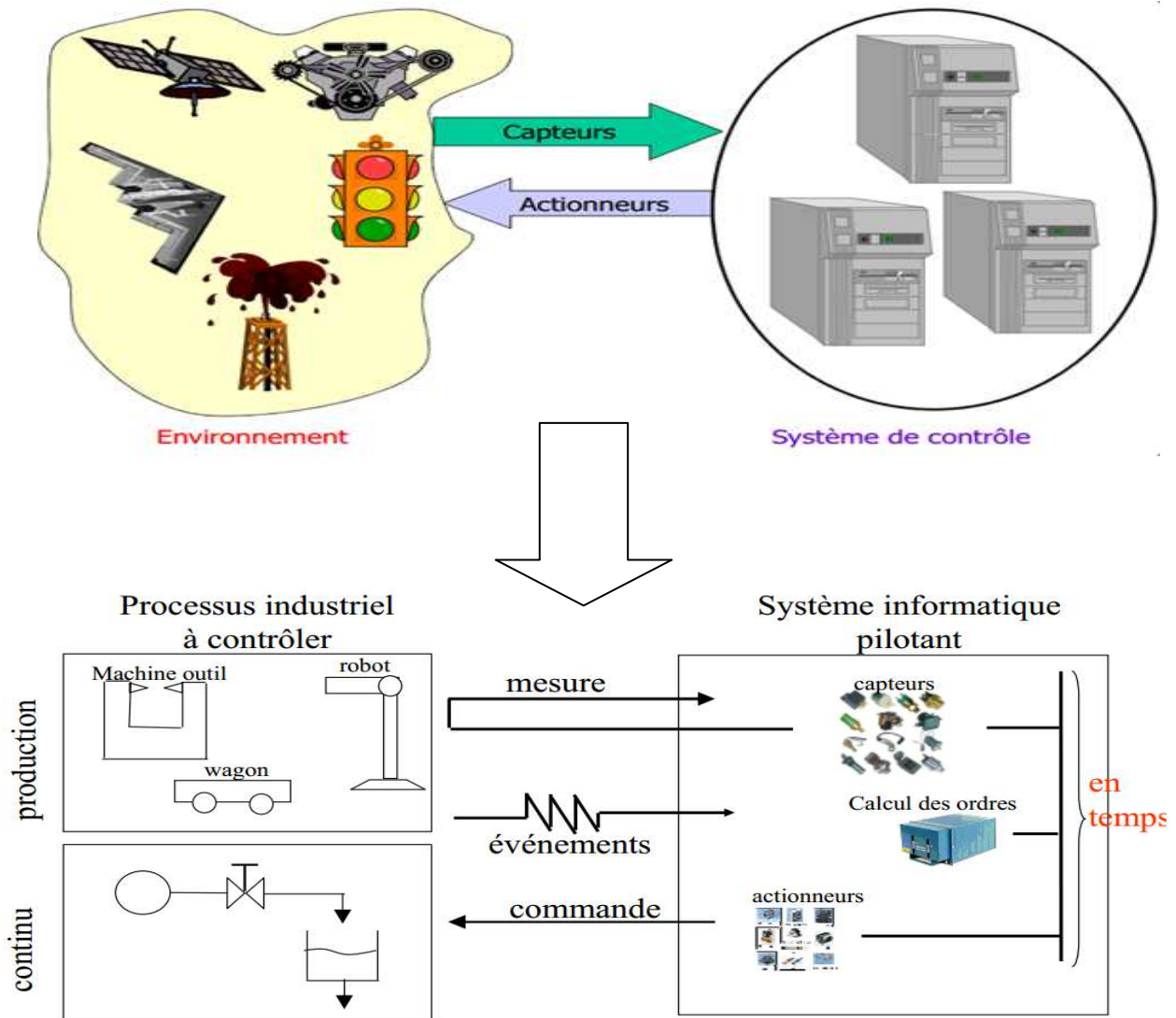


Figure I.1 : système temps réel.

**II.2. Classe des systèmes temps réels :**

Les systèmes temps réel sont classés selon le niveau de criticité de leurs contraintes de temps. On parle alors de systèmes

**II.2.1-Temps réel dur ou à contraintes strictes (Hard Real Time) :**

Dans ce cas, les contraintes temporelles doivent être respectées (deadline), car tout dépassement peut engendrer des situations critiques, voire catastrophiques (par exemple: le système de contrôle du train, d’atterrissage d’un avion).

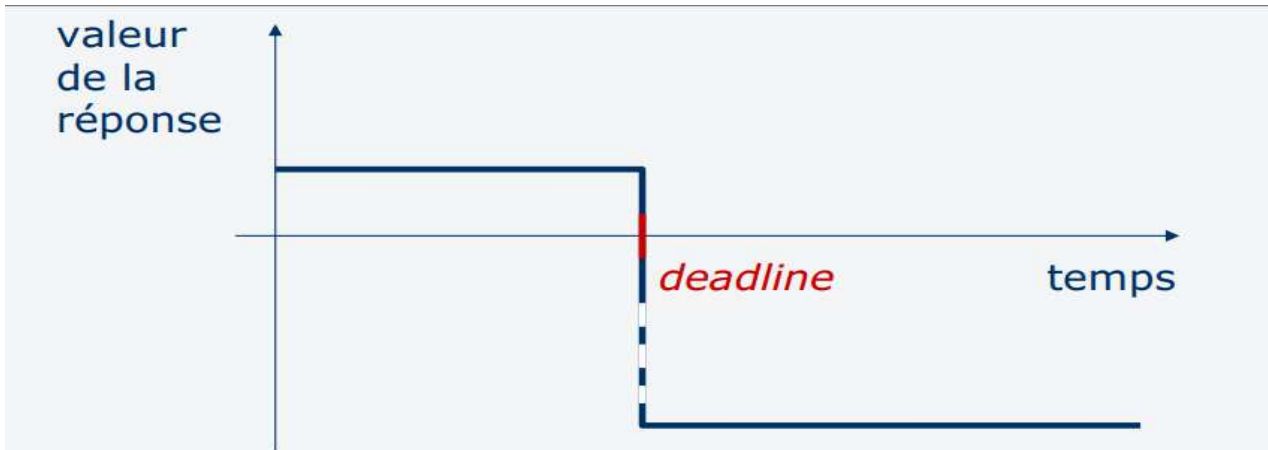


Figure I.2 : Système temps réel dur.

Dans un système temps réel dur la réponse qui doit être dans les délais est vitale et ne dépasse pas le deadline, L'absence de réponse est catastrophique.

### II.2.2-Temps réel souple ou à contraintes relatives (soft real-time) :

Dans ce cas, le respect des contraintes temporelles est important mais le non respect de toutes les contraintes temporelles ne peut pas occasionner de graves conséquences (ex : le système informatique d'une borne interactive multiservice).

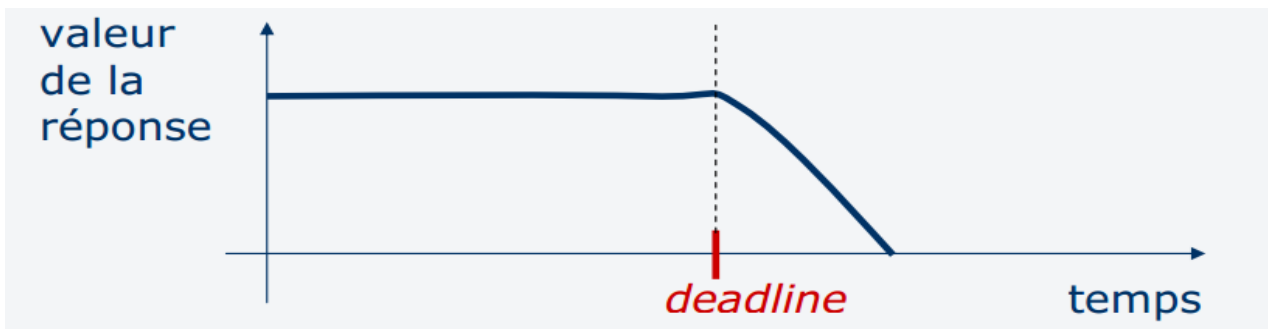


Figure I.3 : Système temps réel souple.

Dans les systèmes temps réel souple la réponse du système après les délais réduit progressivement son intérêt, mais les pénalités ne sont pas catastrophiques.

### II.2.3.Temps réel ferme (firm real time):

Ce type de système se situe à la frontière entre les deux contraintes précédentes. Un système temps réel ferme tolère le dépassement des contraintes temporelles mais à la différence des systèmes à contraintes relatives ces dépassements sont quantifiés (ex : le système de lecture

d'une vidéo, normalement cadencé à 25 images par seconde peut tolérer une dégradation passagère à 20 images par seconde). De plus, un résultat produit après les contraintes temporelles n'est pas pris en compte.

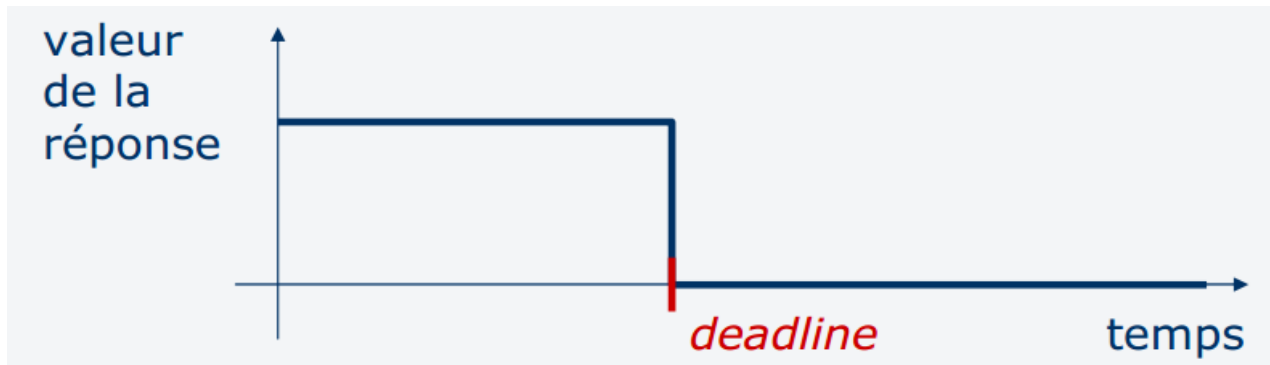


Figure I. 4: Système temps réel ferme

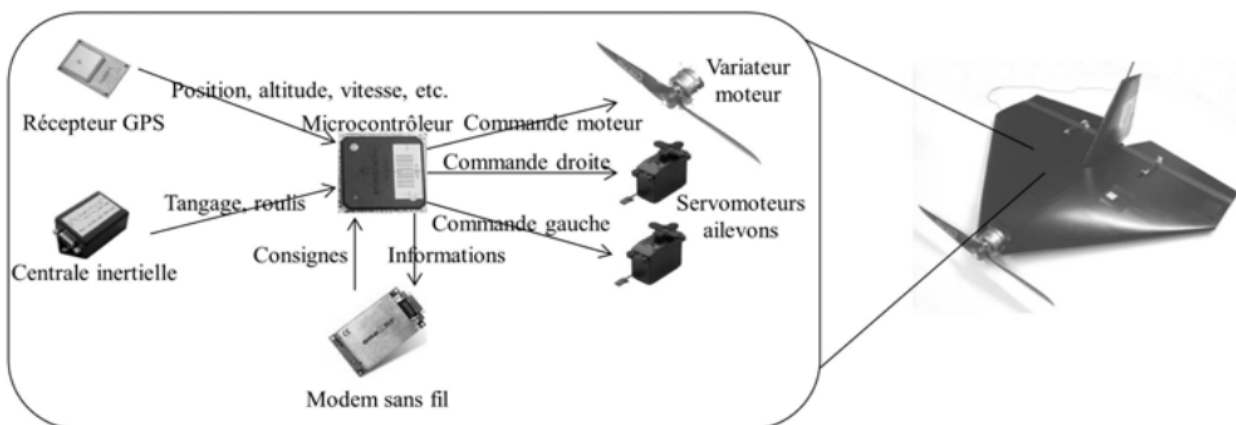
Dans les systèmes temps réel ferme la réponse du système dans les délais est essentielle, mais si elle dépasse le deadline le résultat ne sert plus à rien.

### II.3. Caractéristiques communes des applications temps-réel :

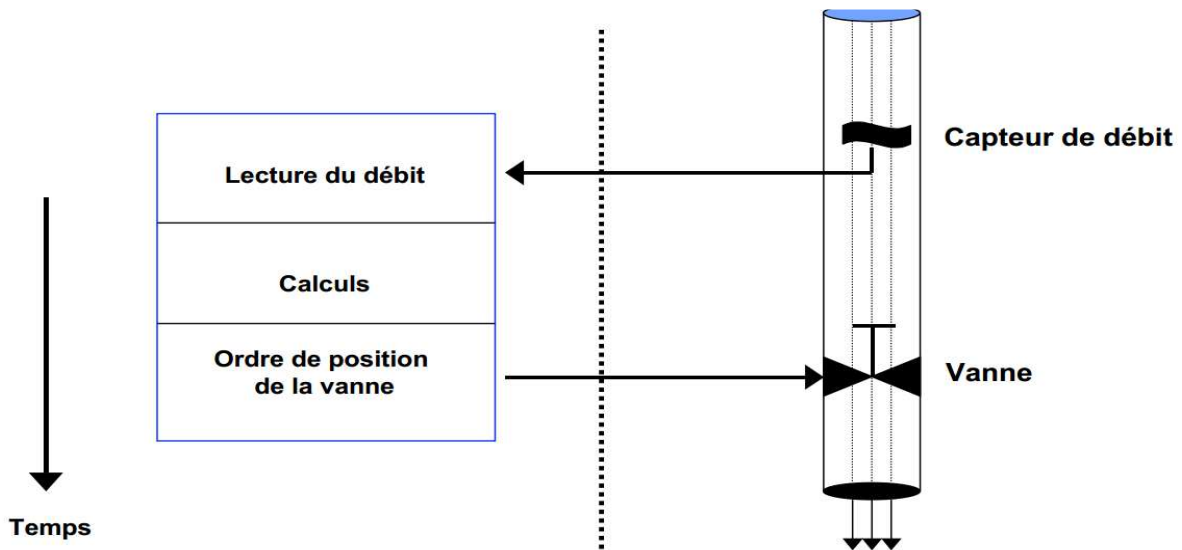
- Un système temps réel interagit avec un environnement extérieur souvent complexe et en évolution.
- Il doit pouvoir interagir avec différents types d'éléments matériels.
- Il doit respecter des contraintes temporelles.
- Il doit garantir une fiabilité importante.

### II.4. Exemples d'applications temps réel :

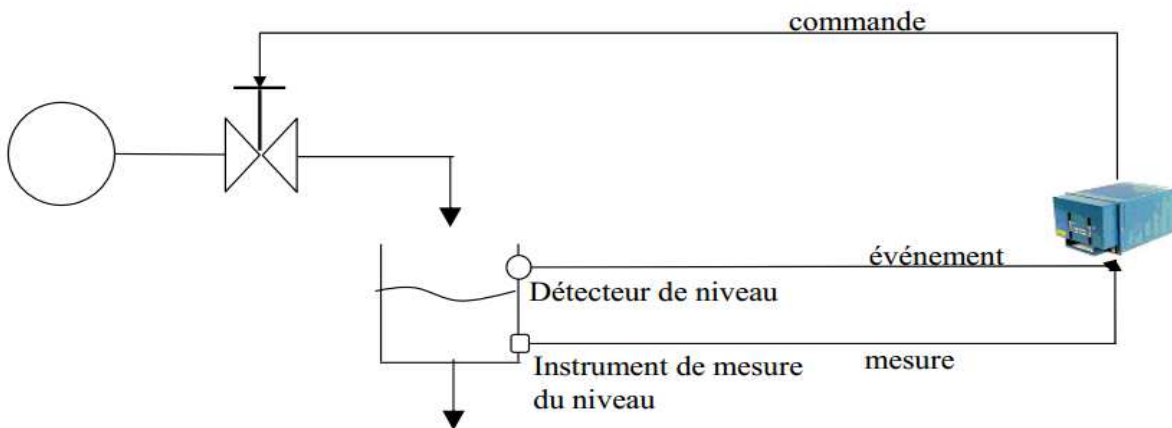
- Système embarqué sur un mini-drone:



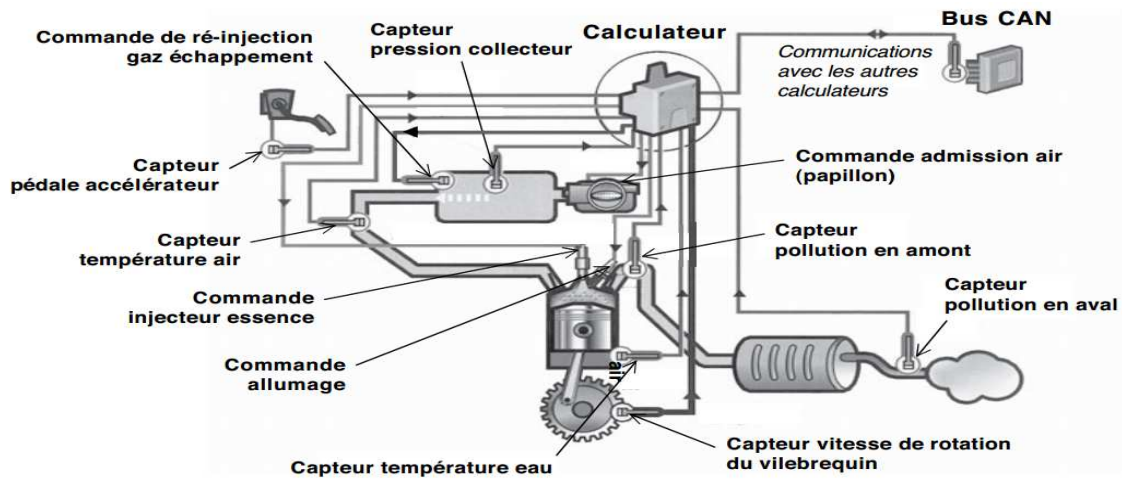
- Système de contrôle de débit :



- Commande d'un procédé continu :



- Système contrôle-commande d'un moteur à combustion :



## **II.5. Les contraintes :**

Les contraintes expriment des restrictions sur les valeurs que peuvent prendre simultanément les variables de décision. On distingue :

### **II.5.1. Les contraintes temporelles :**

Les systèmes temps réel peuvent avoir deux types de contraintes temporelles :

Contraintes strictes (dures) et contraintes souples (relatives). Un système temps réel est dit à contraintes strictes quand une faute temporelle (non respect d'une échéance, arrivée d'un message après les délais, irrégularité d'une période d'échantillonnage, dispersion temporelle trop grande dans un lot de mesures simultanées) peut avoir des conséquences catastrophiques du point de vue humain, économique ou écologique. Un système temps réel est à contraintes souples lorsque le non respect de contraintes temporelles (faute temporelle) est acceptable. On admet alors de ne pas respecter certain pourcentage d'échéances par exemple.

Dans les applications de contrôle/commande temps réel critiques, les traitements de capteurs/actionneurs et les traitements de commande de procédés ne doivent pas avoir de gigue sur les entrées issues des capteurs et sur les sorties fournies aux actionneurs. Dans un tel système, une faute temporelle peut avoir des conséquences catastrophiques autant ou plus qu'une faute de calcul.

### **II.5.2. Les contraintes de ressources :**

- les contraintes d'utilisation de ressources qui expriment la nature et la quantité des moyens utilisés par les tâches, ainsi que les caractéristiques d'utilisation de ces moyens.
- les contraintes de disponibilité des ressources qui précisent la nature et la quantité des moyens disponibles au cours du temps. Toutes ces contraintes peuvent être formalisées sur la base des distances entre débuts de tâches ou potentiels.

## **II.6. Les tâches en temps réel :**

Un système temps réel est constitué d'un ensemble de tâches et chacune d'elles doit effectuer une quantité de calculs. Les résultats produits par ces différentes tâches doivent être d'une certaine qualité mais aussi être fournis avant un instant donné, que nous appellerons l'échéance de cette tâche.

### II.6.1. Définition d'une tâche :

Une tâche est une entité élémentaire localisée dans le temps par une date de début et/ou de fin, dont la réalisation nécessite une durée, et qui consomme un moyen selon une certaine intensité. Plusieurs tâches peuvent constituer une activité, et plusieurs activités peuvent définir un processus.

### II.6.2 Caractéristiques d'une tâche :

Une tâche  $\tau_i$  est généralement caractérisée par une date de réveil  $R_i$ , une durée d'exécution  $T_i$  (temps de calcul), une échéance relative  $D_i$  qui est la date à laquelle la tâche doit être terminée son exécution, une période d'activation  $P_i$ . Une exécution de la tâche est appelée une instance.

- ❖ La date de réveil ou date d'activation (first release ou offset)  **$R_i$**  : correspond à la date à laquelle la première instance de la tâche peut commencer à s'exécuter. Nous considérons que les tâches sont par nature synchrones ( $R_1=R_2=\dots=R_i=\dots=R_n$ ) c'est-à-dire qu'elles sont prêtes à s'exécuter à la date 0 et qu'elles n'ont pas donc de date de réveil particulière (ou alors égale à 0). Cependant, pour les besoins de l'ordonnancement, des dates de réveil pourront être fixées ultérieurement.
- ❖ Durée d'exécution (computing time)  **$T_i$**  : c'est la durée maximale d'exécution d'une tâche, souvent considéré comme le pire temps d'exécution WCET (Worst Case Execution Time), qui correspond à une estimation du plus long temps nécessaire à la fin de l'exécution de la tâche. L'influence des autres tâches sur celui-ci n'est pas prise en compte dans l'estimation car il est dépendant des décisions prises à l'ordonnancement.
- ❖ Période d'activation (period en anglais)  **$P_i$**  : c'est la durée de temps fixe ou minimale entre deux activations de deux instances successives de la tâche  **$\tau_i$** .
- ❖ L'échéance ou délai critique (relative deadline)  **$D_i$**  : est dite relative car elle est relative à la période d'activation de la tâche. Elle fixe la date à laquelle l'instance de la tâche doit être terminée son exécution (temps maximal pour s'exécuter depuis sa date de réveil). Si la tâche n'a pas terminé son exécution avant cette date, il est dit qu'elle rate (ou manque) son échéance et produit une faute temporelle. on dit :

L'échéance est :

- Implicite (requête) si l'échéance est égale à la période ( $D_i = P_i$ ) ;
- Contrainte si elle est inférieure ou égale à la période ( $D_i \leq P_i$ ) ;
- Arbitraire si  $D_i$  et  $P_i$  sont indépendants l'un de l'autre.

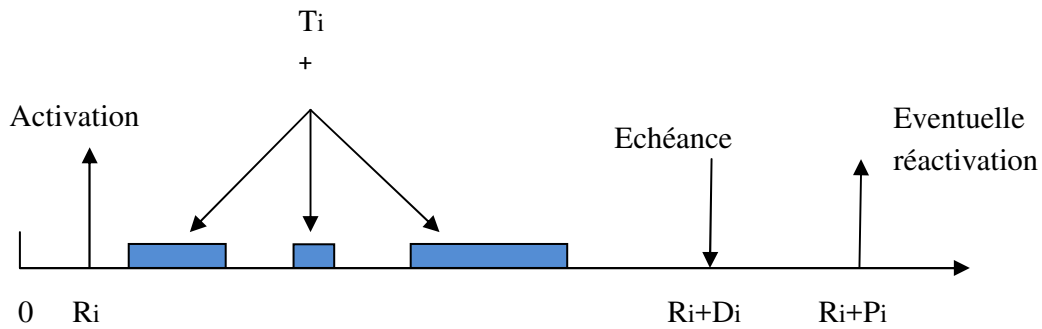


Figure I.5 : Modèle usuelle d'une tâche temps réel.

**II.6.3.Modélisation des tâches :**

La loi d'arrivée d'une tâche définit sa nature. Cette loi s'agit des contraintes temporelles, imposées par le procédé piloté, définissant la répartition des dates d'activation des instances d'une tâche dans le temps. Un modèle de tâches porte le nom de la nature des tâches à laquelle il appartient. On distingue cinq grandes classes de tâches :

**II.6.3.1.Tâches périodiques :**

Les tâches périodique correspondent aux mesures sur le procédé, elles se réveillent régulièrement (toutes les P unités de temps). Par exemple la lecture régulière de l'état d'un capteur. La majorité des tâches constituant, généralement, une application temps réel sont des tâches périodiques.

On distingue :

- ✓ Périodiques strictes : les contraintes temporelles à respecter absolument.
- ✓ Périodiques relatives : les contraintes temporelles qui peuvent être non respectées de temps à un autre.
- ✓ Périodiques à échéance sur requête c.-à-d. que le délai critique (Di)= période (Pi).

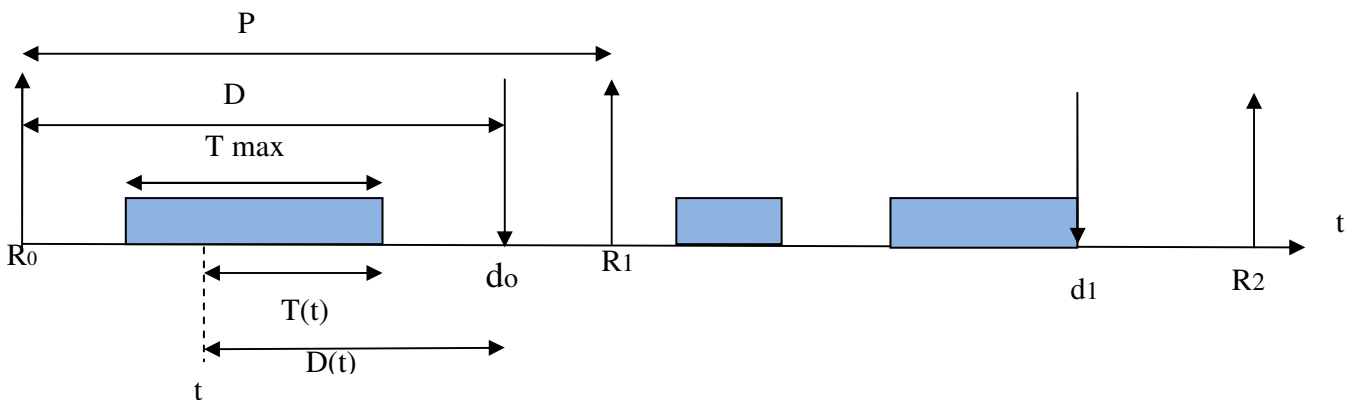


Figure I. 6 : Modèle d'une tâche périodique temps réel.

Avec :

$T_p(R_0, T, D, P)$  et  $0 \leq T \leq D \leq P$  ;

Et :

$R_0$  : date de réveil de la tâche ;

$T$  : durée d'exécution maximal ;

$D$  : délai critique

$P$  : période d'exécution ;

$R_i$  : date de réveil de la  $i$ ème instance de la tâche  $R_i = R_0 + iP$  ;

$d_i$  : échéance  $d_i = R_i + D$  ;

$T(t)$  : temps d'exécution restant à  $t$  ;

$D(t)$  : délai critique dynamique (temps restant à  $t$  jusqu'à  $d$ ) ;

Quand  $D_i = P_i$  : tâche à échéance sur requête.

### II.6.3.2. Tâches apériodiques :

Les tâches apériodiques possèdent souvent des délais critiques, mais pas de période (ni intervalle minimal séparant deux instances), ni de date de réveil. Leurs exécutions sont déterminées par l'arrivée d'évènements (message ou requête de l'opérateur) qui peuvent être produits à tout instant (elles se réveillent de manière aléatoire). La tâche apériodique commence son exécution à une date  $R_i$  (date aléatoire) et elle doit terminer son exécution avant sa date d'échéance  $d_i = R_i + D_i$ .

On distingue :

- ✓ Apériodiques strictes : contraintes temporelles dures à respecter absolument.
- ✓ Apériodiques relatives : contraintes temporelles molles qui peuvent être non respectés de temps à un autre (sans échéance).

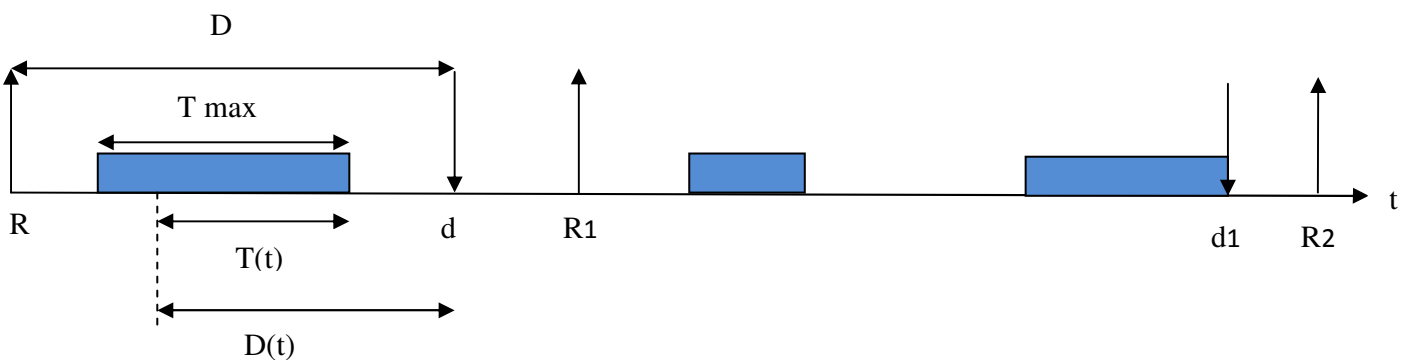


Figure I.7 : Modèle d'une tâche apériodique temps réel.

Avec :

Tap (R, T, D, P) ;

Et :

R : date aléatoire de réveil de la tâche ;

T : durée d'exécution maximal ;

D : délai critique ;

$d_i$  : échéance  $d_i = R_i + D$  ;

$T(t)$  : temps d'exécution restant à  $t$  ;

$D(t)$  : délai critique dynamique (temps restant à  $t$  jusqu'à  $d$ ).

### II.6.3.3. Tâches sporadiques :

Les tâches sporadiques sont très utilisées dans les approches synchrones du temps réel. Une tâche sporadique  $\tau_i$  est caractérisée par une loi d'arrivée sporadique, où la période d'activation n'est pas connue a priori, par contre un intervalle minimal de temps  $M_i$  séparant deux activations successives est donné. La difficulté de validation de système de tâche sporadique réside dans le fait que les dates d'activations des tâches sont inconnues a priori. Une instance peut s'activer à n'importe quelle date après la date  $T_i$  relative à la date d'activation de l'instance précédente. Une tâche périodique est alors un cas particulier de tâche sporadique. Finalement une tâche sporadique  $\tau_i$  est caractérisée par trois paramètres temporels, durée d'exécution  $T_i$ , délai critique  $D_i$  et un intervalle minimal  $M_i$  séparant deux occurrences de  $\tau_i$ .

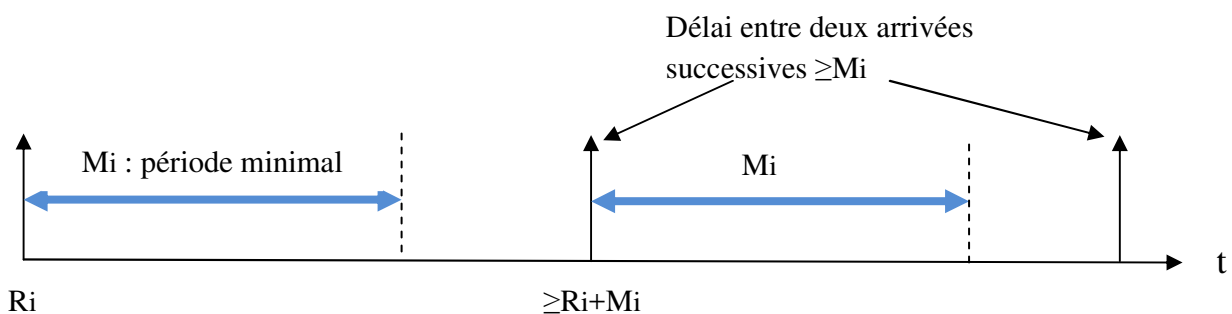


Figure I.8 : Modèle d'une tâche sporadique temps réel.

## II.7. Respect des échéances temporelles : ordonnancement

La limitation des ressources conduit à bloquer des processus (ils ne peuvent progresser du fait de manque de ressource). Afin de respecter en permanence les échéances, il faut gérer efficacement la pénurie et tente de favoriser les processus dont l'avancement est le plus urgent.

Un ordonnancement consiste à définir un ordre sur l'utilisation des ressources du système afin de respecter les échéances temporelles (le but principale de l'ordonnancement). On appelle ordonnanceur (scheduler) le processus système qui gère l'ordonnancement des processus.

L'ordonnanceur des tâches représente une partie essentielle du système de temps réel. Il considère l'entité tâche  $\tau_i$  ainsi que toutes les durées d'exécution ( $T_{max}$ ) de  $\tau_i$ , mais sans pour autant considérer les traitements effectués au sein de ces durées. Il arrive toutefois que l'ordonnanceur prenne en charge certains traitements effectués par les  $T_{max}$ , et ce à des fins de synchronisation entre les tâches. Les objectifs d'un ordonnanceur peuvent différer, (comme par exemple: optimisation de l'utilisation des ressources, minimisation du temps de réponse, ...etc.) mais dans tous les cas, l'ordonnanceur doit veiller au respect des échéances des tâches.

### II.7.1. Les ressources :

La ressource est un moyen technique ou humain destiné à être utilisé pour la réalisation d'une tâche et disponible en quantité limitée.

Plusieurs types de ressources sont à distinguer. Une ressource est renouvelable si après avoir été allouée à une ou plusieurs tâches, elle est à nouveau disponible en même quantité (les hommes, les machines, l'équipement en général), la quantité de ressource utilisable à chaque instant est limitée. Dans le cas contraire, elle est consommable (matières premières, budget), la consommation globale au cours du temps est limitée.

Une ressource est doublement contrainte lorsque son utilisation instantanée et sa consommation globale sont toutes deux limitées (l'argent en est un bon exemple).

Qu'elle soit renouvelable ou consommable, la disponibilité d'une ressource peut varier au cours du temps.

On distingue par ailleurs principalement dans le cas de ressources renouvelables les ressources disjonctives qui ne peuvent exécuter qu'une tâche à la fois (machine-outil, robot manipulateur) et les ressources cumulatives qui peuvent être utilisées par plusieurs tâches simultanément mais en nombre limité (équipe d'ouvriers, poste de travail).

### II.7.2. Quelques définitions :

Nous présentons ci-dessous quelques définitions communément utilisées dans la littérature aussi bien pour le système et l'environnement contrôlé :

➤ Faisabilité :

Un système de tâches  $\tau$  est dit faisable, s'il existe une configuration d'ordonnement pour laquelle toutes les tâches s'exécutent sur une plateforme donnée, respectent bien leurs échéances.

➤ Ordonnançabilité :

Un système de tâches  $\tau$  est dit ordonnançable par A, s'il existe un algorithme A capable d'ordonner toutes les tâches  $\tau_i$  dans le respect de leurs échéances.

➤ Optimalité :

L'algorithme d'ordonnement A est dit optimal, s'il est capable d'ordonner tout système de tâches faisable.

### II.7.3. Problème d'ordonnement :

Un problème d'ordonnement consiste à organiser dans le temps la réalisation des tâches, compte tenu des contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînement) et des contraintes portant sur la disponibilité des ressources requises.

En production, on peut le présenter comme un problème, où il faut réaliser le déclenchement et le contrôle de l'avancement d'un ensemble de commandes à travers les différents centres composant le système.

Un problème d'ordonnement peut être considéré comme un sous problème de planification dans lequel il s'agit de décider de l'exécution opérationnelle des tâches planifiées.

- **Exemple d'ordonnement :**

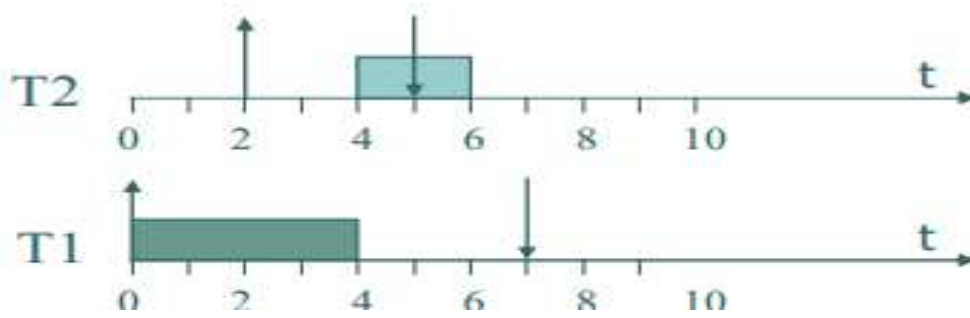
Tâche T1 : arrivée en 0, durée 4, échéance 7.

Tâche T2 : arrivée en 2, durée 2, échéance 5.

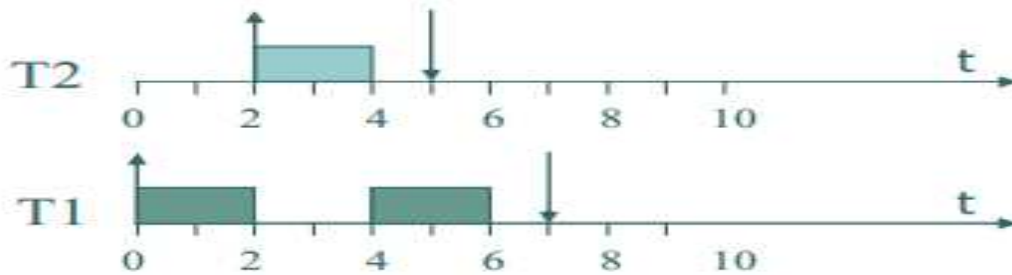
Ordonnement 1 : premier arrivé, premier servi, on n'interrompt jamais une tâche.

Ordonnement 2 : priorité ; T2 plus prioritaire que T1.

Ordonnement 1 : T2 rate son échéance :



Ordonnancement 2 : T2 prioritaire que T1



**II.7.4.Types d’ordonnancements :**

L’ordonnancement consiste à définir ou à choisir une politique pour l’affectation des tâches (en concurrence) aux processeurs durant la vie du système afin de respecter toutes les contraintes temporelles comme l’échéance ou afin d’optimiser d’autres critères temporels (comme temps de réponse ou minimiser la longueur de l’ordonnancement). On distingue :

**II.7.4.1.Ordonnancement hors-ligne (off-line scheduling):**

On parle d’un ordonnancement hors-ligne lorsqu’il existe une séquence d’ordonnancement pré-calculée reproduite indéfiniment avant l’exécution effective (on dit aussi «time driven »scheduling). Dans ce cas, tous les paramètres sont prédéterminés à l’avance tel que : les dates d’activation des tâches. Cette séquence est rangée dans une table et exécutée en ligne par un automate (séquenceur). A l’exécution, l’ordonnanceur est un simple séquenceur (cyclic scheduler).

t=0	t=5	t=8	t=15	t=30	t=32
tache1	tache3	tache1	tache3	tache5	tache4

**Séquence construite hors ligne**



Figure I.9: Exemple d’ordonnancement hors-ligne.

**II.7.4.2.Ordonnancement en ligne (on-line scheduling) :**

Avec un ordonnancement en ligne les décisions d’ordonnancement sont prises en fonction du contenu effectif de la file d’attente de l’ordonnancement (la séquence d’exécution des tâches est établie dynamiquement par l’ordonnanceur). A l’exécution, l’ordonnanceur implante un algorithme d’ordonnancement permettant de savoir à tout instant quel tâche exécutée.

Généralement, on utilise des règles de priorités pour générer de tel ordonnancement.

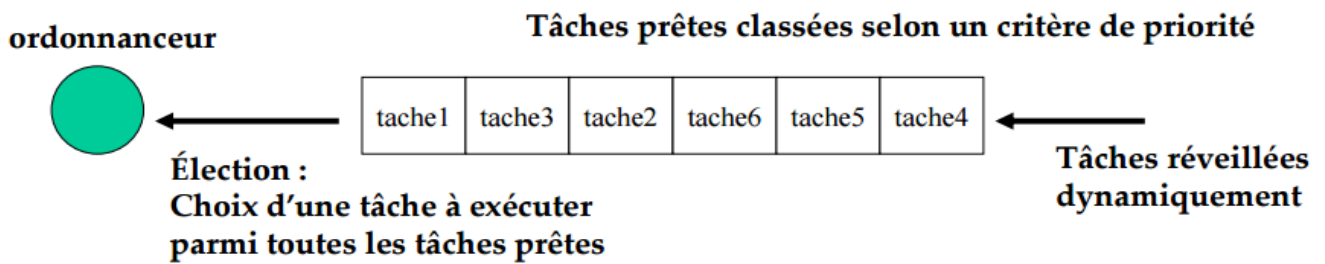


Figure I.10 : Exemple d’ordonnancement en ligne.

**II.7.4.3.Ordonnancement préemptif :**

L’ordonnancement est préemptif lorsqu’il permet l’interruption d’une tâche en cours d’exécution pour en exécuter une autre tâche plus prioritaire. Son exécution est reprise ultérieurement. Notons qu’une tâche demandant une ressource critique, occupée par une tâche moins prioritaire, doit attendre que cette dernière la libère (terminer l’utilisation de la ressource) afin de continuer son exécution.

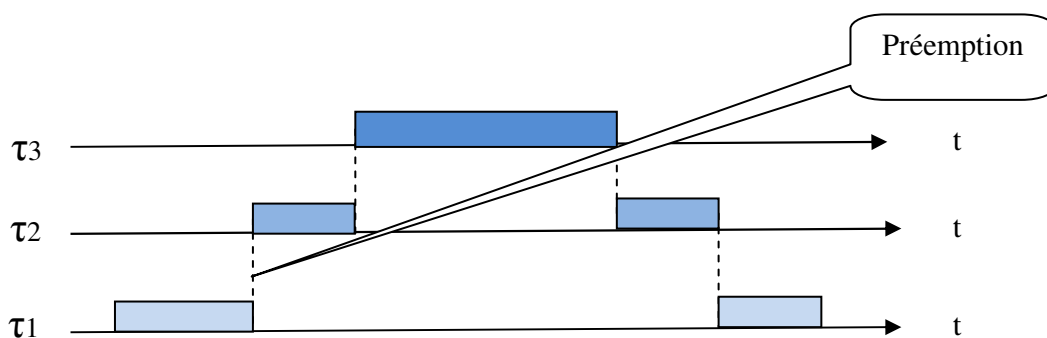


Figure I.11 : Exemple d’ordonnancement préemptif.

**II.7.4.4.Ordonnancement non préemptif :**

On dit qu’un ordonnancement non préemptif s’il n’est pas possible (jamais) d’interrompre une tâche en cours d’exécution. Il doit attendre la terminaison de l’exécution de la tâche en cours,

avant de débiter l'exécution de toute autre tâche. Si une tâche non-préemptive est interrompue, son exécution doit être reprise de nouveau depuis le début.

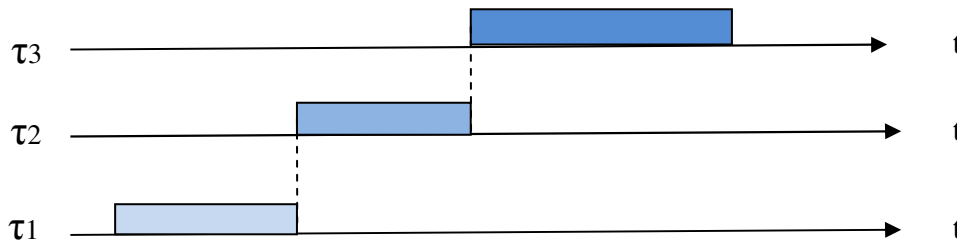


Figure I.12 : Exemple d'ordonnancement non préemptif.

#### II.7.4.5. Ordonnancement statique/dynamique :

Un ordonnancement statique (prédictif) est basé uniquement sur les paramètres des tâches au départ (avant l'activation). Par contre, l'ordonnancement dynamique (réactif) est basé sur les paramètres des tâches qui varient au cours de l'exécution.

#### II.7.4.6. Ordonnancement optimal/ non-optimal :

Un algorithme d'ordonnancement est dit optimal pour un problème donné s'il permet de trouver un ordonnancement qui respecte toutes les contraintes lorsqu'un tel ordonnancement existe. Si l'algorithme optimal ne trouve pas de solution alors aucun autre algorithme ne pourra le faire. Par ailleurs, un algorithme d'ordonnancement non-optimal vise à trouver des solutions approchées (en ignorant une partie des contraintes par exemple).

#### II.7.5. Les objectifs d'ordonnancement :

Dans la résolution d'un problème d'ordonnancement, on peut choisir entre deux grands types de stratégies, visant respectivement à l'optimalité des solutions, ou plus simplement à leur admissibilité.

L'approche par optimisation suppose que les solutions candidates à un problème puissent être ordonnées de manière rationnelle selon un ou plusieurs critères d'évaluation numériques, construits sur la base d'indicateurs de performances. On cherchera donc à minimiser ou maximiser de tels critères. On note par exemple ceux :

- liés au temps :
  - le temps total d'exécution ou le temps moyen d'achèvement d'un ensemble de tâches ;
  - le stock en cours de traitement ;

- différents retards (maximum, moyen, somme, nombre, ... etc.) ou avances par rapport aux dates limites fixées (deadline).
- liés aux ressources :
  - la quantité totale ou pondérée de ressources nécessaires pour réaliser un ensemble de tâches
  - la charge de chaque ressource ;
  - liés à une énergie ou un débit ;
  - liés aux coûts de lancement, de production, de transport,... etc ; mais aussi aux revenus, aux retours d'investissements.

### III. Les systèmes de transport :

Les systèmes de transport sont des systèmes fortement conditionnée par leur environnement, sont objective et de répondre aux besoins de déplacement de biens et de personnes d'un endroit à un autre dans les meilleurs conditions.

#### III.1.Définition d'un système de transport :

Un système de transport, ou moyen de transport, ou mode de transport, c'est une forme particulière de transport qui se distingue principalement par le véhicule utilisé, et par conséquent par l'infrastructure qu'il met en œuvre. Lorsque plusieurs modes de transport sont associés pour concourir à la réalisation d'une opération de transport, c'est le terme multi modalité qui est utilisé.

Un mode de transport est, dans un sens plus général, un accessoire utilisé par un être humain afin de se déplacer d'un point A à un point B. Pour posséder le statut de moyen de transport, celui-ci doit être accessible au public et posséder une instance de brevet approuvée.

Il existe différents modes de transport, de nos jours, le transport routier, ferroviaire, maritime et aérien. Pour son bon fonctionnement, un transport doit être organisé, géré, exploité, réglementé et contrôlé, que ce soit pour le transport de marchandises ou le transport de personnes.

#### III.2.Généralités sur les systèmes de transport :

##### III.2.1.Système physique :

Dans cette section, on décrit brièvement les principaux composants "physiques" d'un système de transport. Un réseau de transport est représenté par deux éléments :

- l'infrastructure (ou la topologie qui représente la structure du système),
- les entités de transport (train, bus,...etc).

### III.2.1.1.L'infrastructure :

L'infrastructure d'un réseau décrit l'ensemble des voies ouvertes aux entités de transport. Les éléments de bases de l'infrastructure d'un réseau sont les lignes, les arrêts, les tronçons, les terminus et les itinéraires d'un passager. [17]

Les lignes sont composées d'un ensemble fini d'arrêts ou de tronçons, selon le point de vue que l'on adopte. La structure d'une ligne peut être plus ou moins complexe selon le rôle de ses arrêts par rapport à ceux des autres lignes et le nombre de véhicules qui la composent. Sur chaque ligne, les entités de transport réalisent une boucle au cours de laquelle elles s'arrêtent aux stations de cette ligne. La conception d'une ligne se fait sur des critères géographiques, sociaux et économiques.

Les arrêts sont les éléments de base d'un système de transport. Ils représentent les nœuds du réseau. Un arrêt représente un espace où les entités de transport effectuant une tournée s'immobilisent pendant un certain temps pour permettre aux passagers d'embarquer ou de débarquer. On différencie trois types d'arrêt :

- **Des arrêts simples :** ils sont rattachés à une seule ligne, il ne peut donc pas s'effectuer d'échange de passagers sur ces arrêts.
- **Des points d'échange de passagers :** ce sont des points de correspondance desservis au moins par deux lignes.
- **Des points de retournement :** ces arrêts correspondent à des extrémités de ligne. Les véhicules de transport y font demi-tour.

Les particularités physiques de certains arrêts obligent les entités de transport à se soumettre à des contraintes. C'est, par exemple, le cas, pour un arrêt d'un réseau de bus dont la voie est commune à celles d'autres véhicules (voitures particulières), les bus ne doivent pas s'immobiliser trop longtemps à cet arrêt sous peine de créer un embouteillage.

Les tronçons sont considérés comme des liaisons orientées (sens unique ou double sens) entre leurs arrêts extrémités. L'ensemble des tronçons dans un réseau peut être décomposé en plusieurs classes : certains tronçons présentent la particularité d'être associés à des couloirs réservés aux transports publics appelés voies propres ou sites propres. Les autres, correspondent à des voies partagées par plusieurs modes de transport (véhicules particuliers, transports collectifs, transport de marchandises). Un tronçon est caractérisé par sa longueur, et la vitesse commerciale de déplacement de l'entité de transport. Ceci permet de déterminer un temps de déplacement entre deux arrêts.

Les terminus sont des arrêts extrémités c'est-à-dire les arrêts de début de fin de la ligne.

L'itinéraire d'un usager dans un système de transport, nous la définissons comme une suite alternée d'arrêts et de tronçons d'une ligne ou de plusieurs lignes. Un itinéraire peut contenir une partie d'une ligne ou la ligne entièrement. Une ligne peut être un itinéraire d'un usager si ce dernier n'effectue pas de correspondances au cours de son trajet. Chaque itinéraire permet donc d'assurer le transport en commun de passagers d'un arrêt origine à un arrêt destination. Il existe deux types d'itinéraires : commercial et spécial. Dans un itinéraire commercial, la montée et la descente des clients s'effectuent aux différents arrêts de cet itinéraire. Tandis que dans un itinéraire spécial, la montée et la descente des clients s'effectuent uniquement aux terminus.[17]

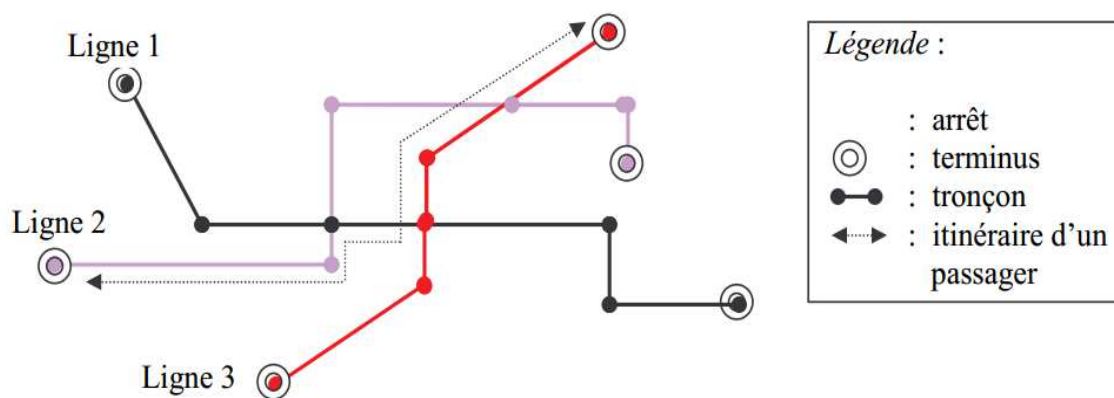


Figure I.13 : Les éléments de l'infrastructure d'un système de transport.

### III.2.1.2. Entités de transport :

Le deuxième élément composant le système physique des transports publics est représenté par les entités ou ressources de transport qui sont des véhicules destinés à l'embarquement et au débarquement de passagers. Ils se présentent sous forme de bus, trains, tramway...etc. Dans un système de transport public, un exploitant dispose d'une flotte de véhicules caractérisée par :

- le nombre global de véhicules ;
- le type de véhicule et ses caractéristiques (identiques pour toutes les entités dans le cas d'une flotte homogène, variables pour une flotte hétérogène : minibus, bus articulé...etc.) : capacité, dimensions (longueur), caractéristiques dynamiques (accélération, décélération) et environnementales (mode d'énergie, bruit... etc.)

Chaque ligne d'un système de transport est desservie par des entités de transport, selon son importance (zones desservies, tranche horaire du déplacement considéré au cours d'une journée,

fréquence de passage souhaitée, niveau de la demande, etc.), de sorte à renforcer le service sur les lieux où la charge en usagers est importante.

### III.2.2. Système de gestion :

Le deuxième composant des systèmes de transport est le système de gestion. Il pilote le système physique pour qu'il atteigne certains objectifs, en assurant entre autres la conception des horaires et l'information des usagers.

Plusieurs travaux de recherche dans le domaine du transport portent sur la conception et le développement d'outils d'aide à la gestion qui permettent aux exploitants d'intervenir dans la résolution de différents problèmes. Parmi les questions principales auxquelles ces recherches tentent de répondre, on trouve :

- Quels sont les objectifs "pertinents" que doivent se fixer les exploitants afin de gérer efficacement ces systèmes de transport ?
- Quelles sont les méthodes et les outils à mettre en œuvre par les exploitants pour atteindre leurs objectifs ?

Notons que même si les exploitants sont les principales entités citées ici intervenant dans la gestion d'un système de transport, il est utile de rappeler que d'autres acteurs sont également concernés, de près ou de loin, par cette gestion. En effet, les systèmes de transport sont souvent exploités, en tenant compte de l'ensemble des paramètres liés aux différents acteurs. Le but de cette exploitation est d'assurer la coordination des services et leur qualité et de résorber les perturbations survenues sur une partie du système. Trois types d'acteurs collaborent ainsi entre eux ou interagissent au sein d'un même système de transport public :

- ❖ Les usagers : ce sont les utilisateurs et les bénéficiaires des services offerts par les transports en commun. On peut les répartir en deux classes : usagers captifs et non captifs. Les usagers captifs sont ceux qui ne disposent pas d'alternative de transport. Tandis que les usagers non captifs ont d'autres moyens de transport possibles (véhicule personnel par exemple). C'est cette catégorie de clientèle qu'il est plus difficile de capter et pour laquelle les plus gros efforts d'amélioration sont souvent réalisés.
- ❖ Les autorités organisatrices de transport : Cet acteur externe représente divers organismes civils, à différents niveaux de juridiction locale : conseils régional et général, ministère des transports, villes, communautés urbaines, etc. Ces organismes interviennent notamment dans la définition des stratégies ou des politiques de transport au niveau de l'exploitation des transports.

- ❖ Les exploitants ou opérateurs de transport : ce sont souvent des sociétés et des compagnies de transport du secteur privé à qui une collectivité locale confie la responsabilité de l'exploitation des transports collectifs. [6]

### **III.3. Les types de transport :**

#### **III.3.1. Transport terrestres :**

On désigne :

- Le transport routier : Dans le domaine des secteurs d'activité, le transport routier est une activité réglementée de transports terrestres, qui s'exerce sur la route. Elle englobe à la fois le transport routier de personnes, de marchandises et le déménagement. Le transport routier rassemble les modes de transport suivants : les véhicules particuliers, les véhicules utilitaires (légers et lourds).
- Le transport ferroviaire : Le transport ferroviaire est généralement plus réglementé que le transport routier et très souvent les pouvoirs publics participent directement à la fourniture des services. Les systèmes ferroviaires nécessitent une infrastructure particulière appelée voie ferrée. Le matériel ferroviaire, de part sa technique de roulement, ne peut pas monter ou descendre de pente très importante, ni effectuer de courbe trop prononcée. Pour s'adapter au terrain, la construction des lignes de chemin de fer a nécessité l'établissement d'Ouvrages d'art : ponts, viaducs et tunnels.

#### **III.3.2. Transport aériens :**

Le transport aérien est une activité économique consistant à transporter des passagers ou du fret par la voie aérienne sur la base d'un contrat représenté, dans le cas des passagers, par un billet.

Le premier acteur du transport aérien est constitué par les compagnies aériennes. Elles exploitent des avions de ligne généralement, plus rarement des hélicoptères voire auparavant des dirigeables, entre aéroports constituant un réseau de destinations.

#### **III.3.3. Transport maritimes :**

Le transport maritime est le mode de transport le plus important pour le transport de marchandises (marine marchande). Le transport de personnes par voie maritime a perdu beaucoup d'importance du fait de l'essor de l'aviation commerciale, il subsiste de manière significative dans

seulement deux créneaux importants : les traversées courtes et les croisières. On peut y ajouter pour être complet les voyages d'exploration scientifiques et les courses sportives.

### III.4. Système de transport vu en tant qu'un Systèmes à Événements Discrets :

Les systèmes de transport sont caractérisés par un espace d'état discret et un changement d'état produit par des événements. Ce sont des systèmes pour lesquels les variables d'état changent seulement à certains instants associés à des événements ponctuels.

Les STP sont composés de ressources (entités de transport, infrastructure, etc.) partagées par plusieurs utilisateurs (passagers par exemple) contribuant tous aux mêmes objectifs (transporter des passagers, transmettre des informations, etc.). Le fonctionnement des STP est caractérisé par :

- le parallélisme : de nombreux événements peuvent se dérouler simultanément et indépendamment dans diverses parties du système (par exemple, l'arrivée ou le départ de deux entités de transport d'un arrêt du réseau) ;

- la synchronisation : c'est un phénomène qui nécessite la disponibilité simultanée de plusieurs ressources ou la vérification simultanée de plusieurs conditions afin d'exécuter une tâche. Par exemple, pour qu'un passager puisse se déplacer entre deux arrêts, il faut d'une part la présence du passager, et d'autre part la disponibilité d'un véhicule qui assure son déplacement ;

- la concurrence : elle apparaît au moment où un utilisateur doit choisir une ressource parmi plusieurs. Citons par exemple le cas d'un passager ayant plusieurs choix d'itinéraires pour se rendre à une destination sur un réseau de transport, ou le cas de  $n$  utilisateurs ( $n > 1$ ) ayant besoin simultanément d'une même ressource de capacité inférieure à  $n$ . Pour ce phénomène, certains événements excluent l'apparition simultanée d'autres événements.[6]

## IV. Réseaux de Petri

Le formalisme des réseaux de petri est un outil permettant l'étude des systèmes dynamiques et discrets. Ils constituent un outil riche en termes de propriétés et de résultats analytiques. Par rapport à d'autres modèles, leur principal avantage est de proposer une modélisation graphique simple, et qui permet de plus, l'utilisation d'une algèbre mathématique (algèbre linéaire usuelle ou algèbre des dioïdes) pour l'analyse du système étudié. On constate alors qu'ils forment un outil puissant qui permet d'utiliser des techniques algébriques avec des considérations plus structurelles pour établir certains résultats.

Les réseaux de Petri constituent un formalisme bien adapté à la modélisation de systèmes discrets qui permet d'inclure de façon naturelle leurs modes de fonctionnement. Plusieurs classes

de réseaux de Petri ont été utilisées pour la description du comportement des systèmes de transport.

Nous vous présenterons la description de ce formalisme graphique et sa définition ainsi que son principe de fonctionnement.

**IV.1.Elément de base d'un réseau de Petri :**

Un réseau de Pétri (RdP) est un graphe biparti, avec une représentation mathématique graphique simple. Constitué de 2 sortes de nœuds : Les places (P) et les transitions (T) .une place n'est reliée jamais à une autre place directement, et il en va de même pour la transition. Des arcs orientés relient les places aux transitions et les transitions aux places.les place représentées par des cercles et les transitions par des barres.

Dans un RdP, le nombre de places est fini, et non nul. Chaque place, peut contenir un ou plusieurs jetons (représentés par des points) qui modélisent la dynamique du système.

Le tableau suivant nous montre la signification des graphiques utilisé dans les réseaux de Petri telle que les places et les transitions. [37]





Elément	Place	Transition	Arc orienté	Jeton
Signification	Un état du système	Un changement d'état (action)	Reliant soit une place à une transition. Soit une transition à une place	Etat actuel du système
Symbole graphique				

Tableau I.1 : la signification des graphiques utilisé dans RdP.

• Graphe formé de

- ensemble de places  $P = \{P1, P2, P3, \dots\}$
- ensemble de transition  $T = \{T1, T2, T3, \dots\}$
- marquage initial  $M = \{m1, m2, m3, \dots\}$

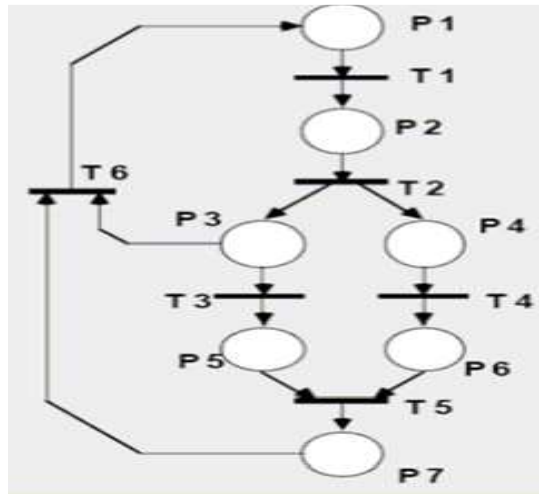
**Exemple :**

Figure I.14 : Exemple de réseau de Petri comportant 7 places, 6 transitions et 15 arcs orientés.

On dit que la place P2 est en amont ou est une entrée de la transition T2

On dira que la place P7 est en aval ou est une sortie de la transition T5

- une transition sans place d'entrée est appelée transition source.
- une transition sans place de sortie est appelée transition puits.

**IV.2. Marquage des places :**

Chaque place contient un nombre entier (positif ou nul) de marques ou jetons. Le nombre de marque contenu dans une place  $P_i$  sera noté soit  $M(P_i)$  soit  $m_i$ . Le marquage du réseau à l'instant  $i$ ,  $M_i$  est défini par le vecteur de ces marquages  $m_i$  c-à-d  $M_i = (m_1, m_2, \dots, m_n)$ .

Le marquage dit initial décrit l'état initial du système modélisé ( $M_0$ ).

Les jetons circulent dans les places selon certaines règles. Cette circulation symbolise l'évolution dynamique du système. Le marquage initial (celui indiqué sur le dessin de la figure (15)) donne la position initiale des jetons.

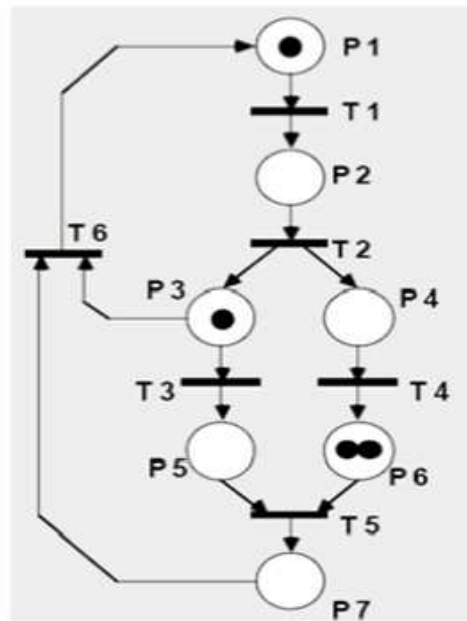


Figure I.15 : Exemple de réseau de Petri marqué avec un vecteur de marquage  $M$

le marquage initial de la figure (15) est :  $M_0 = (1, 0, 1, 0, 0, 2, 0)$

### IV.3.Franchissement de transition.

Les règles de franchissement et de circulation des jetons sont :

- Le franchissement d'une transition ne peut s'effectuer que si chacune des places en amont de cette transition contient au moins une marque.
- Une transition sans place amont est toujours validée, on dit que c'est une transition source.
- Le franchissement (le tir) d'une transition  $T_j$  consiste à retirer une marque (jeton) dans chacune des places en amont de la transition  $T_j$  et à ajouter une marque dans toutes les places en aval de  $T_j$ .
- Lorsqu'une transition est validée cela n'implique pas qu'elle sera franchie immédiatement.
- Il y a un seul franchissement à la fois.
- Le franchissement d'une transition est indivisible.
- Le franchissement d'une transition à une durée nulle (sauf dans les RdP temporisés qu'on va voir plus tard).

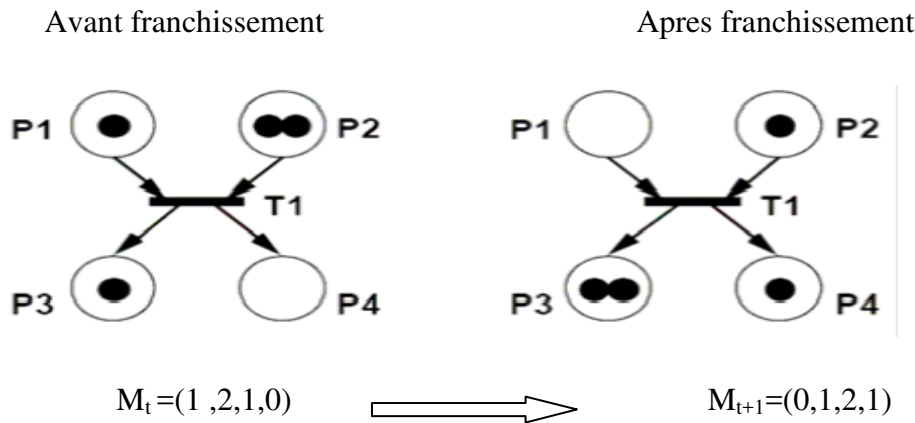


Figure I.16 : franchissement d'une transition

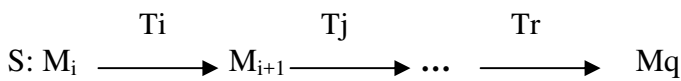
**Remarque :**

Si une transition est validée, cela n'implique pas qu'elle sera immédiatement franchie. Ces règles introduisent en effet un certain indéterminisme dans l'évolution des réseaux de Petri, puisque ceux-ci peuvent passer par différents états dont l'apparition est conditionnée par le choix des transitions tirées. Ce fonctionnement représente assez bien les situations réelles où il n'y a pas de priorité dans la succession des événements.[8]

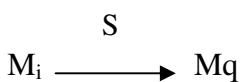
Note : Il y a conflit si plus d'une transition peuvent être franchies pour une même place d'origine, on choisit l'une des transitions, de manière non-déterministe.

**IV.4.Séquences de franchissement :**

Une séquence de franchissement est définie à partir d'un marquage  $M_i$ , elle représente une suite de transition franchissables successivement  $T_i, T_j, \dots$  et qui mène vers un autre marquage  $M_j$ , qui peut être le marquage de départ.



On dira que la séquence  $S = T_i, T_j, \dots, T_r$  est applicable à partir de  $M_1$ , on écrira:



**IV.5.Quelque réseau de pétri particuliers :**

Certain RdP ont des structure particulières, c'est-à-dire qu'ils possèdent des caractéristiques et des propriétés que n'ont pas les RdP dans le cas le plus générale

#### IV.5.1. Graphe d'états :

Un réseau de Petri non marqué est un graphe d'états si et seulement si toute transition a exactement une place d'entrée et une place de sortie.

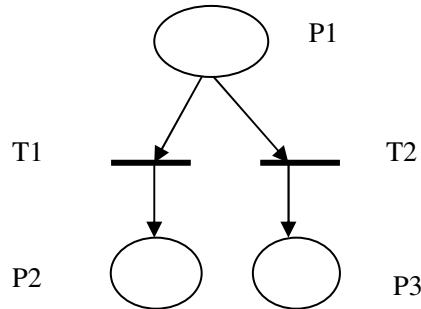


Figure I.17 : Graphe d'états.

#### IV.5.2. RdP synchronisé :

Un ensemble d'événements externes est associé au RdP ; ces événements permettent le franchissement de certaines transitions. Un tel RdP est dit synchronisé.

Considérons le RdP modélisant la machine décrite ci-dessous. On associe à ce RdP l'ensemble d'événements A, D, S où A désigne l'événement « Arrivée pièce », D l'événement « Démarrage service », S l'événement « Sortie pièce ». La figure (I.18) représente le système modélisé par un RdP synchronisé.

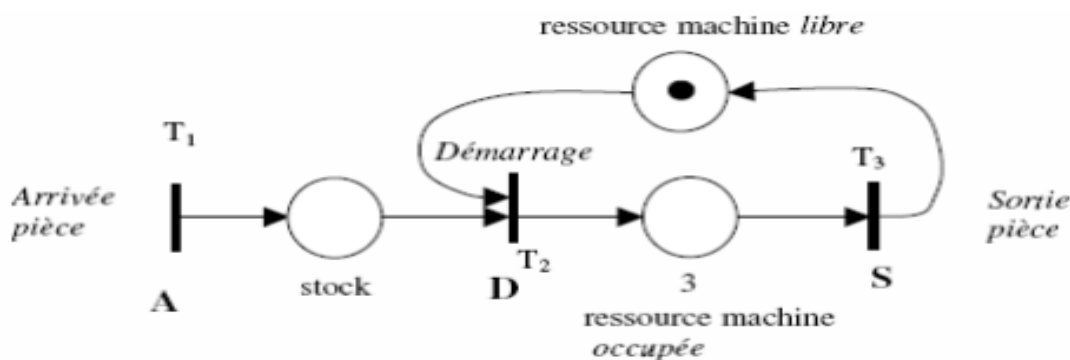


Figure I.18 : Un système modélisé par un RdP synchronisé.

- Le tir de la transition T1 est lié à l'occurrence de l'événement A.
- Le tir de la transition T2 est lié :
  - A la validation de la transition, matérialisée par la présence d'au moins un jeton dans la place «stock» et d'un jeton dans la place « ressource machine libre » ;
  - Au démarrage effectif du service (occurrence de l'événement D) ;

- Le tir de la transition T3 est lié à l'occurrence de l'événement S.

#### IV.5.3. Graphe d'événements :

Un graphe d'événements (GE) est une classe des RdP pour laquelle :

Chaque place a exactement une transition d'entrée et une transition de sortie, tous les arcs orientés place-transition ou transition-place sont pondérés à 1. Un Graphe d'événement est donc dual d'un graphe d'états

Dans le cas où on associe aux places des entiers, appelés par la suite temporisations, le graphe d'événements sera appelé graphe d'événements temporisé.

#### IV.5.4. RdP temporisés :

Un RDP permet de décrire un système dont le franchissement dépend du temps .Il y a principalement deux méthodes pour modéliser la temporisation :

- soit temporisation associées aux transitions (un temps qui correspond à la durée de franchissement de cette transition) modèle **T-temporisé**
- Soit temporisation associées aux places (un temps qui correspond à la durée minimale de séjour d'un jeton dans une place) modèle **P-temporisé**. [37]

##### IV.5.4. 1. Les réseaux de Petri T-temporisés :

Voici un RdP T-temporisé permettant de présenter le principe de cette structure. Le réseau a été choisi suffisamment simple pour fournir un exemple clair mais cependant significatif (figure I.19).

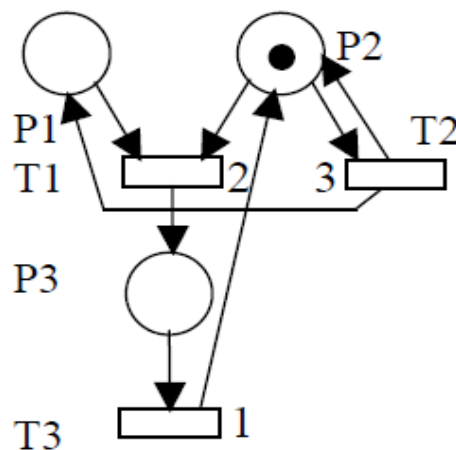


Figure I.19 : réseaux de Petri T-temporisés

Au début de la séquence, la transition T1 n'est pas validée (pas de jeton dans P1). La transition T2 est validée, mais temporisée à 3 unités. Lorsque les trois unités sont écoulées, T2 est franchie et restitue immédiatement le jeton à la place P2, tout en donnant un jeton à la place P1.

Les transitions T1 et T2 sont alors validées, mais cette fois, T1 est prioritaire puisque sa temporisation n'est que de 2 unités de temps. T1 est alors franchie, fournissant un jeton à la place P3, jeton qui y séjourne une unité de temps. T3 est alors franchie et fournit un jeton en P2. Le cycle recommence.

#### IV.5.4. 2. Les réseaux de Petri P-temporisés :

Soit le RdP P-temporisé de la figure I.20. Ce réseau a été choisi suffisamment simple pour fournir un exemple clair. Les places P1, P2, P3 sont respectivement temporisées à 2, 3 et 1 unités de temps, comme il est indiqué sur le modèle.

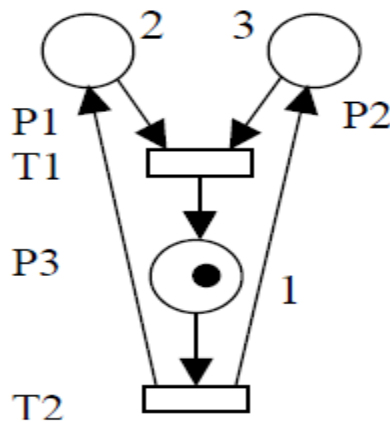


Figure I.20 : réseau de Petri P-temporisés

Au début de la séquence, le jeton situé dans la place P3 y séjourne 1 unité de temps. T2 est franchie, distribuant un jeton dans chacune des places P1 et P2. Deux unités de temps plus tard, le jeton de P1 est disponible, mais ne peut franchir la transition T1 avant que le jeton de P2 soit disponible à son tour. T1 est alors franchie et l'on retrouve la situation initiale.

#### IV.6. Graphe d'événements temporisés :

##### IV.6.1. Définition :

Les GET (graphe d'événement temporisé) constituent une classe de réseaux de Petri pour lesquels toute place n'a qu'une transition en amont et une transition en aval. Un graphe d'événement est dit temporisé si des temporisations sont associées aux places et/ou transitions. Dans la suite de ce Mémoire, nous considérons des graphes d'événement P-temporisés, où les temporisations sont associées aux places. La figure (I.21) représente un GET.

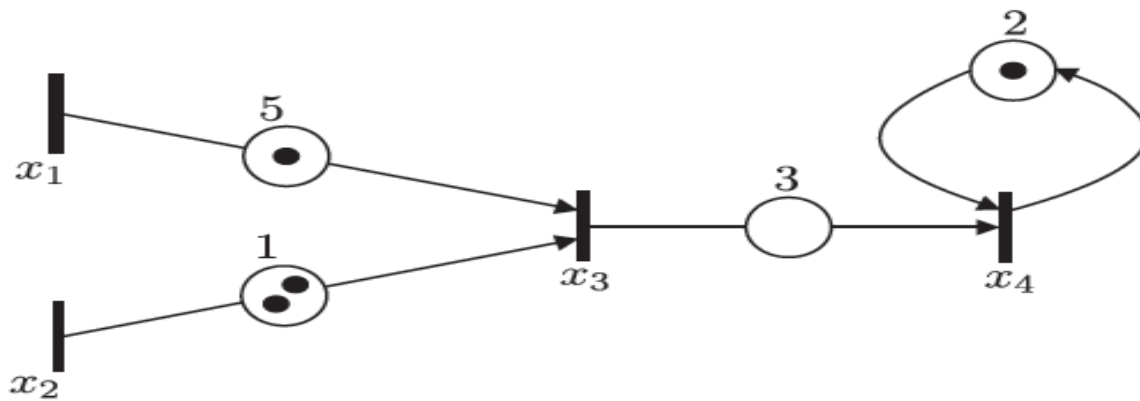


Figure I.21 : Exemple de graphe d'événement temporisé

Dans le cadre de la modélisation des systèmes à événements discrets, nous considérerons qu'une transition d'un GET correspond à un événement, et que le tir de celle-ci est une occurrence de cet événement. Dans la figure (I.21), il est clair que la transition  $x_3$  exprime la synchronisation des événements  $x_1$  et  $x_2$  retardés respectivement de 5 et 1 unités de temps. Les places temporisées, qui induisent un temps minimum de séjour pour les jetons, ont pour rôle de traduire une tâche qui possède une durée. Les jetons qui sont initialement présents dans le système induisent un décalage. Par exemple, le tir numéro  $k$  de la transition  $x_3$  sera engendré par le tir numéro  $k - 1$  de la transition  $x_1$  et l'activation numéro  $k - 2$  de  $x_2$ .

#### IV.6.2. Propriétés des graphes d'événements temporisés :

Nous rappelons brièvement quelques caractéristiques des GET au travers des propositions suivantes :

**Proposition 1** : Le nombre de jetons d'un circuit est constant dans un GET.[37]

**Proposition 2** : Un GET est vivant si, et seulement si, tout circuit élémentaire contient au moins une place initialement marqué.[37]

#### IV.7. Représentation de la dynamique :

Les graphes d'événements temporisés sont utilisés comme outil de modélisation intermédiaire. Si cette modélisation graphique constitue une première étape, la seconde étape est la mise en équation du modèle graphique. Le comportement d'un graphe d'événements temporisés peut s'exprimer sous forme d'équation linéaires dans les diodes  $\bar{R}_{max}$  ou  $\bar{R}_{min}$ . Ces équations représentent l'évolution du graphe dans les domaines temporels et événementiels. Si on considère  $\tau_{ij}$  la temporisation correspondante à la place  $P_{ij}$  (c'est-à-dire la place qui relie la transition  $t_j$  à la

transition  $t_i$ ) avec marquage initial noté  $m_{ij}$ . La plus grande temporisation du graphe d'événements considéré est notée  $\tau_{max}$ . définie par :

$\tau_{max} = \max(\tau_{ij})$ . Le plus grand marquage initial des places du graphe d'événements considérés est noté  $m_{max}$  et est défini par  $m_{max} = \max(m_{ij})$ .

D'une manière générale, le comportement d'un graphe d'événements temporisés est représenté sous l'une des deux formes définies dans le graphe qui suit. [37]

#### IV.7.1. Fonctions dateurs et fonctions compteurs

L'évolution du graphe d'événement peut être représentée dans le domaine temporel par les fonctions compteurs, et dans le domaine événementiel par les fonctions dateurs, nous on s'intéresse uniquement aux fonctions dateurs.

#### IV.7.2. Fonction dateurs :

On associe à chaque transition du graphe considéré une fonction de la variable  $k \in \mathbb{N}^*$ , correspondant à la date du  $k^{ième}$  franchissement de la transition, cette fonction est appelée dateur. [16]

Pour une transition nommée  $x$  par exemple, les activations successives de cette transition reçoivent des numéros successifs  $k$  à partir d'un instant initial où l'on commence à numéroter les événements en partant d'une valeur de  $k$  possiblement négative, mais la même pour toutes les transitions : alors  $x(k)$  désigne la date de l'activation numérotée  $k$  de la transition  $x$ . La fonction  $x(\cdot)$  est appelée dateur associée à la transition  $x$ . Les dateurs sont définis sur le domaine événementiel car  $k$  est un numéro d'événement. On considère l'exemple de la Figure (I.22). Les barres dans les places indiquent les temporisations (en nombre de tops d'horloge par exemple). Dans ces conditions, les dateurs sont à valeurs entières. Les équations sont indiquées sur la figure en notations traditionnelles.

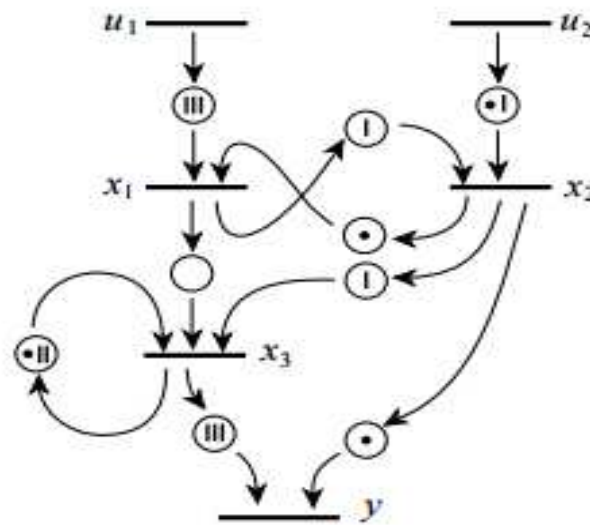


Figure I.22 : Un graphe d'événements temporisé.

Les équations dateurs :

$$x_1(k) = \max (x_2(k - 1), u_1 (k) + 3)$$

$$x_2(k) = \max (x_1(k) + 1, u_2 (k - 1) + 1)$$

$$x_3(k) = \max (x_1 (k), x_2(k) + 1, x_3(k - 1) + 2)$$

$$y(k) = \max (x_2 (k - 1), x_3 (k) + 3)$$

Le raisonnement est le suivant, en se concentrant par exemple sur la transition  $x_2$ . L'activation numéro  $k$  de  $x_2$  est conditionnée par :

- l'activation numéro  $k$  de  $x_1$  car il n'y a pas de jeton dans la place entre  $x_1$  et  $x_2$  initialement ;
- l'activation numéro  $k - 1$  de  $u_2$  car il y a un jeton dans la place entre  $u_2$  et  $x_2$  initialement (en effet,  $x_2$  peut être activée une fois — si un jeton arrive du côté de  $x_1$  — en consommant le jeton du marquage initial du côté de  $u_2$  ; ensuite, il faut obligatoirement attendre que  $u_2$  soit activée avant de pouvoir assister à d'autres activations de  $x_2$ ).

Par ailleurs, comme un jeton arrivant dans la place entre  $x_1$  et  $x_2$  doit rester au moins une unité de temps dans cette place avant de devenir disponible (même chose entre  $u_2$  et  $x_2$ ), on doit décaler d'au moins une unité de temps les activations de  $x_2$  par rapport à celles de  $x_1$  (ou de  $u_2$ ) qui les conditionnent. On peut donc écrire :

$$x_2 \geq x_1(k) + 1$$

et 
$$x_2 \geq u_2(k - 1) + 1$$

soit 
$$x_2 \geq \max (x_1(k) + 1, u_2(k - 1) + 1)$$

De cette façon, on peut mettre en équations le GTE de la figure (I.21) :

$$x_3(k) = \max ( x_1(k - 1) + 5, x_2(k - 2) + 1)$$

$$x_4(k) = \max (x_3(k) + 3, x_4(k - 1) + 2)$$

## V. Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté quelques définitions qui seront utiles dans les deux chapitres qui suivent. Ce chapitre est organisé en trois parties :

La première partie est consacrée à une brève présentation des systèmes temps réel, les notions de tâches, leurs natures et caractéristiques, et les problèmes d'ordonnement en temps réel

La deuxième partie présente quelques généralités sur les systèmes de transport qui est considéré comme sous-classe des systèmes dynamiques à événements discrets.

Nous consacrons la troisième partie à introduire brièvement les réseaux de Petri, leurs propriétés, leurs différentes classes, définitions et principes de fonctionnement.

# Chapitre II

### I. Introduction :

La plupart des dispositifs autonomes en termes d'énergie (appelés systèmes embarqués) sont handicapés par la fracture entre leurs consommations et leurs ressources. Ces appareils utilisent des composants électroniques fonctionnant à des fréquences de plus en plus élevées, ce qui garantit une performance sans cesse croissante mais en contrepartie augmente leur consommation en énergie.

Ces système nécessitent l'utilisation des processeurs de plus en plus puissant, tout en restant limité par les ressources énergétique disponibles .Des études ont montré qu'il pouvait a lui seul utiliser plus de 50% de l'énergie lorsqu'il est sollicité intensivement. Doncla consommation d'énergie est réduite par l'utilisation optimale du processeur et un bon ordonnancement.

Dans ce chapitre on va présenter les concepts de base liés à l'énergie et quelques techniques d'optimisationénergétique.

### II.Le microprocesseur :

Le microprocesseur ( $\mu$ P) ou (Central Processing Unit) l'unité centrale de traitement (CPU), est un circuit intégré complexe caractérisé par une très grande intégration et doté des facultés d'interprétation et d'exécution des instructions d'un programme informatique. Il est chargé d'organiser les tâches précisées par le programme et d'assurer leur exécution. Il doit aussi prendre en compte les informations extérieures au système et assurer leur traitement. (C'est le cerveau du système (ordinateur)).

Un  $\mu$ P est un composant électronique, numérique et programmable :

**Electronique** : Un  $\mu$ P est un circuit intégré constitué par les composants électroniques de bases.

**Numérique** : Les entrées et les sorties aussi que les commandes au niveau du  $\mu$ P sont de nature numérique

**Programmable** : C'est cette qualité qui rend le  $\mu$ P intelligent. On peut modifier le comportement d'un système à base de  $\mu$ P en modifiant le programme qu'il exécute.

Un microprocesseur est un processeurdont tous les composants ont été suffisamment miniaturisés grâce à l'invention du transistor pour être regroupés dans un unique boîtier, cette miniaturisation a permis :

- D'augmenter les vitesses de fonctionnement des processeurs, grâce à la réduction des distances entre les composants.
- De réduire les coûts, grâce au remplacement de plusieurs circuits par un seul.
- D'augmenter la fiabilité, en supprimant les connexions entre les composants du processeur, (on supprime l'un des principaux vecteurs de panne).
- de créer des ordinateurs bien plus petits comme les micro-ordinateurs.
- De réduire la consommation énergétique (plus un transistor est petit, moins il a besoin d'énergie).

### III. Qu'est-ce que la puissance ? l'énergie ? :

Deux métriques sont couramment utilisées pour qualifier la performance énergétique des programmes. La première est la puissance, la deuxième est l'énergie. Ces deux métriques représentent deux choses distinctes, mais liées.

La notion la plus simple à comprendre est l'énergie, elle correspond grossièrement à la quantité d'énergie à fournir à l'ordinateur pour qu'il puisse réaliser le calcul qu'on lui demande. Plus le calcul sera long et complexe, plus la quantité d'énergie nécessaire pour réaliser ce calcul est importante.

La puissance peut être vue comme une consommation énergétique instantanée, celle-ci ne dépend pas de la quantité (ou longueur) du calcul. Pour bien comprendre, on peut considérer une analogie avec un trajet en voiture. Notre voiture consomme une certaine quantité d'essence, c'est-à-dire d'énergie, plus nous roulons vite et plus nous roulons longtemps, plus il faudra d'essence. Dans cette analogie, la puissance est équivalente à la consommation instantanée.

Cette consommation instantanée ne dépend pas de la durée du parcours, mais plutôt de notre vitesse, plus on roule vite plus la consommation instantanée sera importante. La consommation instantanée est liée à la quantité d'essence, la quantité d'essence consommée correspond à la consommation moyenne sur le trajet multiplié par le temps du parcours. De la même façon, puissance et énergie sont liées, l'énergie est égale à la puissance moyenne multipliée par le temps, ou plus exactement à l'intégrale de la puissance dans un intervalle de temps  $[a, b]$ . Mathématiquement, on exprime l'énergie en utilisant la formule suivante :

$$E = \int_a^b P(t) dt \quad (\text{II.1})$$

On exprime souvent la puissance « P » en watts (W) et l'énergie « E » en joules (J) ou kilowatt-heure (kWh). Un joule correspond à un watt par seconde.

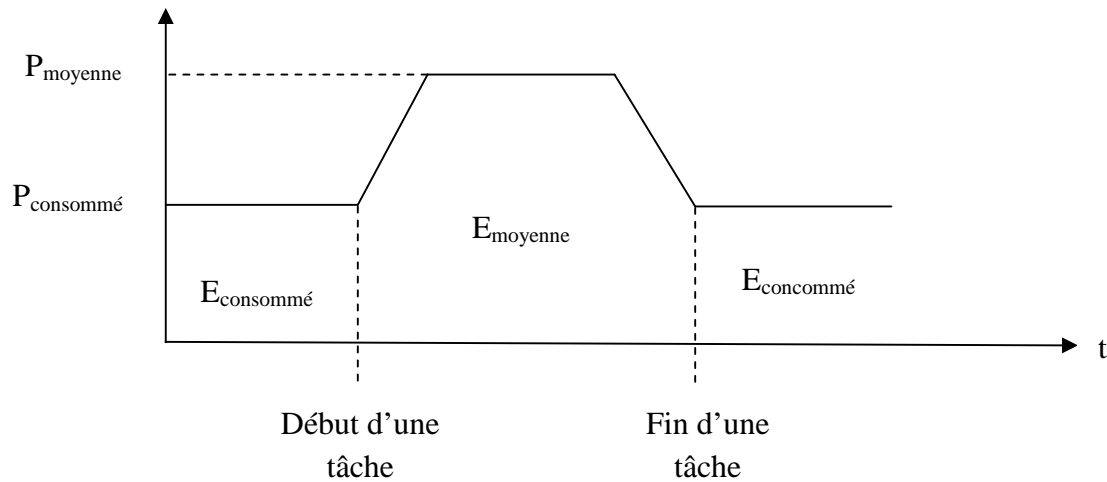


Figure II.1 : Puissance consommée en fonction de temps.

On peut voir sur le schéma, la puissance consommée par l'exécution d'un programme. Lorsque le programme n'est pas encore démarré ou après qu'il a fini, la puissance consommée est relativement faible. Elle correspond à la puissance nécessaire pour maintenir l'ordinateur allumé. Lorsque le programme s'exécute, on voit sur le schéma que la puissance consommée est plus importante, en effet l'ordinateur a besoin de plus d'électricité pour pouvoir faire les calculs demandés, la puissance moyenne nécessaire à l'exécution du programme.

L'énergie nécessaire à l'exécution du programme (l'énergie consommée  $E_c$ ) est égale à l'intégrale de la puissance par le temps d'exécution du programme, plus exactement la puissance moyenne multipliée par le temps d'exécution, alors l'énergie  $E_c$  s'écrit :

$$E_c = P_{\text{moyenne}} \times t \quad (\text{II.2})$$

#### IV. Consommation énergétique d'un processeur :

Les processeurs sont fabriqués avec des composants électroniques que l'on appelle des transistors, reliés pour former des circuits plus ou moins compliqués. Afin d'expliquer pourquoi notre processeur chauffe et comment diminuer sa consommation énergétique, il va falloir expliquer comment fonctionnent ces transistors. La grande partie des pertes énergétiques à l'intérieur d'un processeur a lieu dans ces transistors, de plus, une grande partie

des astuces des fabricants repose justement sur les propriétés des transistors utilisés dans nos ordinateurs.

La consommation énergétique du processeur est basée sur des évaluations réalisées pour différentes architectures CMOS, qui sont la technologie dominante dans les circuits électroniques

#### IV.1.Rappels sur le transistor CMOS

Il existe différents types de transistors, chacun avec ses particularités, ses avantages et ses inconvénients. On ne va pas en parler plus que ça, mais il faut préciser que les transistors utilisés dans nos ordinateurs sont des transistors à effet de champ à technologie **CMOS**.

Mais qu'est-ce qu'un transistor **CMOS** ?

Il s'agit simplement d'un composant relié au reste du circuit électronique par trois morceaux de fil conducteur (Source, Grille, Drain) que l'on appelle **broches**. Nous allons appliquer une tension électrique sur ces broches (attention à ne pas la confondre avec le courant électrique), et cette tension représentera soit **0** soit **1** en fonction du transistor utilisé.

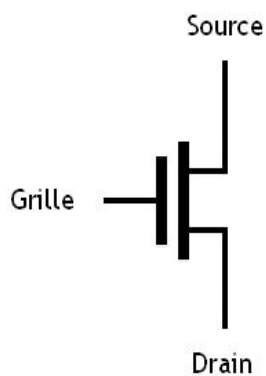


Figure II.2 : Transistor CMOS.

Dans les processeurs, on utilise notre transistor comme un interrupteur qui réagit en fonction de sa grille, suivant la valeur de la tension qui est appliquée sur la grille, le transistor conduira ou ne conduira pas le courant entre la source et le drain. En clair, appliquez la tension adéquate et la liaison entre la source et le drain se comportera comme un interrupteur fermé et conduira le courant, le transistor sera alors dit dans l'état passant. Par contre, si vous

appliquez une autre tension adéquate sur la grille, cette liaison se comportera comme un interrupteur ouvert et le courant ne passera pas, le transistor sera dit dans l'état bloqué.

Il existe deux types de transistor en fonction de leur fonctionnement sur l'alimentation ( $V_{dd}$ ) ou sur la masse ( $V_s$ ), respectivement N(transistor NMOS) et P(transistor PMOS), ces deux transistors sont placés symétriquement entre l'alimentation et la masse (figure II.3), ce qui constitue la fonction de base réalisée par des transistors CMOS. Un inverseur de signal, permet, en fonction du niveau de tension appliqué sur la grille des transistors, d'avoir soit le transistor de type N passant, soit le transistor de type P passant tel que :

- Les transistors **NMOS** (N) qui s'ouvrent lorsqu'on place une tension égale à zéro sur la grille et se ferment si la tension placée sur cette même grille représente un 1.
- Les **PMOS** (P) ils se ferment lorsque la tension sur la grille est nulle, et s'ouvrent si celle-ci représente un 1.

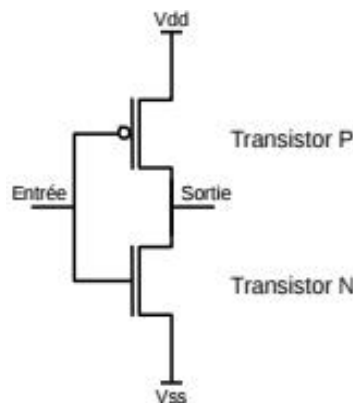


Figure II.3 : Un inverseur, fonction de base réalisée par des transistors CMOS

La technologie CMOS est utilisée dans la plupart des circuits intégrés, cependant, son fonctionnement produit des pertes de courant, ces pertes se traduisent par une consommation d'énergie et par un échauffement du circuit. La consommation d'un inverseur CMOS (et de toute autre fonction) peut être regroupée en deux familles, il s'agit de la consommation dynamique et la consommation statique. La puissance totale  $P_{total}$  d'un circuit numérique CMOS peut être modélisée par l'équation :

$$P_{total} = P_{dynamique} + P_{statique} \quad (II.3)$$

Les principes de base de la consommation dans les circuits CMOS sont exprimés par la suite.

**IV.2. La consommation dynamique :**

En régime dynamique deux facteurs sont prépondérants, d'une part le courant de court-circuit, d'autre part le courant de commutation. Ces contributions apparaissent lors de la commutation des transistors.

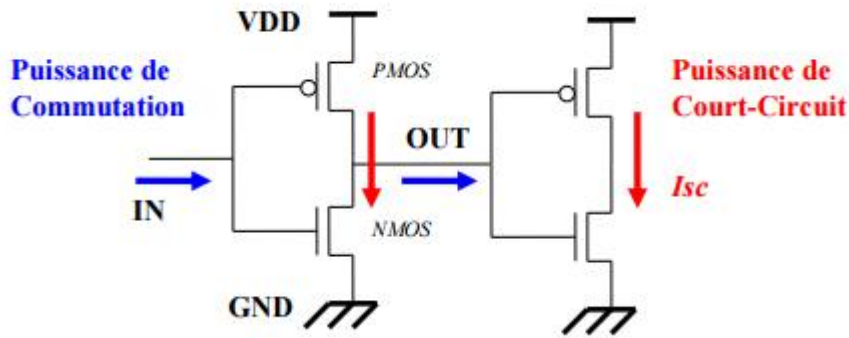
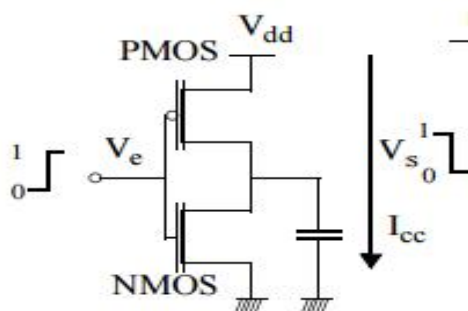


Figure II.4 : Puissance dynamique d'une porte logique

**IV.2.1 Courant de court-circuit :**

Lors d'un changement d'état, un transistor devient passant tandis que le transistor complémentaire devient bloquant. Durant cette transition, les deux transistors (PMOS et NMOS) sont passants pendant un court laps de temps, ils se comportent alors comme une résistance entre l'alimentation et la masse pendant leur changement d'état, provoquant un courant de court-circuit  $I_{cc}$ .



- $V_{dd}$  : tension d'alimentation
- $V_e$  : tension d'entrée
- $V_s$  : tension de sortie
- $I_{cc}$  : courant de court-circuit

Figure II.5 : Courant de court-circuit dans un inverseur CMOS

D'où l'expression :

$$P_{cc} = V_{dd} \times I_{cc} \tag{II.4}$$

Ce courant est proportionnel au temps de montée  $T_m$  (durée pour une transition 0-1 complète), et aux dimensions du transistor. Ce courant est de l'ordre du  $\mu A : 10^{-6}$ , soit une grandeur très supérieure au courant inverse statique.

**IV.2.2.Courant de commutation (liée à la charge et la décharge d'une capacité) :**

Pour mettre en évidence la consommation due au courant de commutation on reprend l'exemple de l'inverseur avec une charge en sortie modélisée par une capacité  $C_{ch}$ .

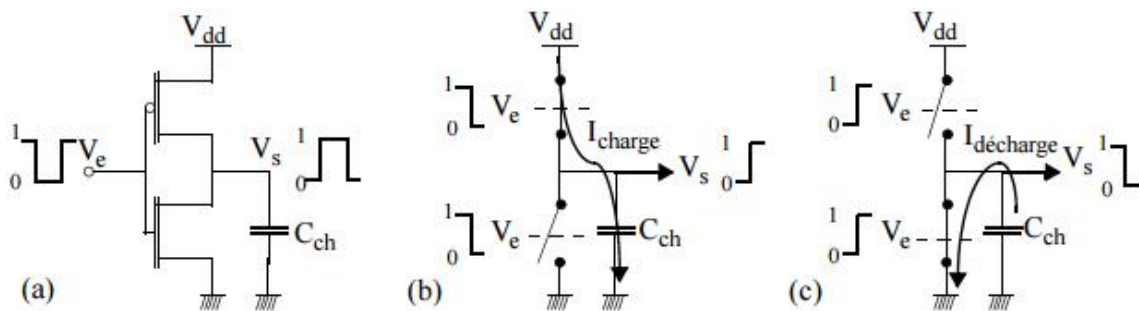


Figure II.6 : Courant de commutation dans un circuit CMOS.

On représente le comportement de l'inverseur CMOS avec en entrée une transition descendante (figure 6 « b ») ou une transition montante (figure 6 « c »). On modélise les portes NMOS et PMOS comme étant idéales par des interrupteurs.

- Transition descendante : le transistor PMOS est passant, le transistor NMOS est bloqué. Il y a donc charge de  $C_{ch}$ , un courant de charge ( $I_{charge}$ ), fourni par l'alimentation, charge  $C_{ch}$ . Le calcul, sur un intervalle de temps  $[0, T_m]$  (nécessaire pour une transition de 1 à 0), de l'énergie  $E_{1-0}$  fournie par l'alimentation, et de l'énergie  $E_{stockée}$  accumulée par  $C_{ch}$  est :

$$P(t) = V_{dd} \times I_{alim}(t) = V_{dd} \times C_{ch} \times \frac{dV_s}{dt} \tag{II.5}$$

D'où :

$$E_{1-0}(T_m) = \int_0^{T_m} P \, dt = V_{dd} \times \int_0^{V_{dd}} C_{ch} \cdot dV_s = C_{ch} \times V_{dd}^2 \tag{II.6}$$

Et :

$$E_{stockée} = \int_0^{T_m} P_{C_{ch}}(t) \, dt = \int_0^{V_{dd}} C_{ch} \cdot V_s \cdot dV_s = \frac{1}{2} C_{ch} \times V_{dd}^2 \tag{II.7}$$

Avec :

$I_{\text{alim}}$  : courant instantané fourni par l'alimentation ;

$C_{\text{ch}}$  : capacité de charge ;

$P(t)$  : la puissance aux borne du circuit ;

$P_{C_{\text{ch}}}$  : la puissance aux borne de  $C_{\text{ch}}$  ;

$V_{\text{dd}}$  : tension d'alimentation ;

$T_{\text{m}}$  : temps de montée des transistors ;

$V_{\text{s}}$  : tension en sortie.

On voit que l'énergie stockée par  $C_{\text{ch}}$  ne représente que la moitié de l'énergie fournie par l'alimentation. La seconde moitié est dissipée par effet joule dans le réseau de transistors PMOS.

- Transition montante : le transistor PMOS est bloqué, le transistor NMOS est passant, il y a donc décharge de  $C_{\text{ch}}$ . Le courant de décharge  $I_{\text{décharge}}$  fourni par la charge  $C_{\text{ch}}$  parcourt le réseau NMOS où se dissipe l'énergie :

$$E_{\text{stockée}} = \frac{1}{2} \times C_{\text{ch}} \times V_{\text{dd}}^2 \quad (\text{II.8})$$

Mais l'intervalle  $[0, T_{\text{m}}]$  représente le temps minimal nécessaire pour effectuer pleinement une transition en sortie de l'inverseur. Pour décrire ce comportement au niveau des processeurs il faut considérer que pour un cycle d'horloge, plusieurs milliers ou millions de transitions interviennent, d'où le modèle :

$$P_{\text{commutation}} = f C_{\text{ch}} V_{\text{dd}}^2 \quad (\text{II.9})$$

tel que :

: le nombre moyen de commutations par cycle d'horloge.

$f$  : la fréquence d'horloge.

D'où l'expression globale :

$$P_{\text{commutation}} = \sum_i^n f r_i C_{\text{ch}_i} V_{\text{dd}}^2 \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$n$  : le nombre de transition ;

$r_i$  : le nombre moyen de commutation de la cellule  $i$  et  $C_{\text{ch}_i}$  sa capacité de charge.

Par conséquent, on déduit de l'analyse précédente l'expression de la puissance dynamique :

$$P_{\text{dynamique}} = P_{\text{court-circuit}} + P_{\text{commutation}} \quad (\text{II.11})$$

$$P_{\text{dynamique}} = V_{\text{dd}} \cdot I_{\text{cc}} + \sum_i^n f r_i C_{ch_i} V_{\text{dd}}^2 \quad (\text{II.12})$$

On se rend compte lors de cette étude que les paramètres qui génèrent ces pertes en puissance en régime dynamique sont liés aux caractéristiques matérielles du composant comme la taille des transistors, la tension d'alimentation, la fréquence d'horloge et le nombre de transitions.

### IV.3. Consommation statique :

Lorsqu'un circuit CMOS ne commute pas, sa consommation est faible (due à la résistance interne entre l'alimentation et la masse), mais il reste quand même des courants parasites dont le plus important est le courant de fuite résultant du courant «sous-seuil» et du «courant-inverse».

- Le courant « sous-seuil » : est la somme des courants engendrés par la diffusion de porteurs entre le drain et la source du transistor en régime de faible inversion c'est-à-dire le courant de fuite lorsque la tension entre la grille et la source est inférieure à la tension seuil, ce courant est la plupart du temps négligé.
- Le courant inverse  $I_{\text{inverse}}$  est la somme des courants de fuite dans les diodes parasites formées entre le drain, la source et le substrat, c'est-à-dire, le courant minoritaire inverse qui se crée entre les jonctions, son ordre de grandeur est le femto-ampère (fA :  $10^{-15}$ ). Ils sont négligeables tant que  $V_{\text{dd}}$  est supérieure à  $V_{\text{seuil}}$ , avec  $V_{\text{dd}}$  tension d'alimentation, et  $V_{\text{seuil}}$ , la tension seuil caractéristique de la technologie.

Donc la puissance statique consommée est le produit de la tension d'alimentation par le courant de fuite :

$$P_{\text{statique}} = V_{\text{dd}} \times I_{\text{fuite}} = V_{\text{dd}} \times I_{\text{inverse}} \quad (\text{II.13})$$

Dans cette formule,  $I_{\text{fuite}}$  est la somme des courants parasites en régime statique, ce qui donne :

$$P_{\text{statique}} = V_{\text{dd}} \cdot (I_{\text{seuil}} + I_{\text{diode}} + I_{\text{grille}}) \quad (\text{II.14})$$

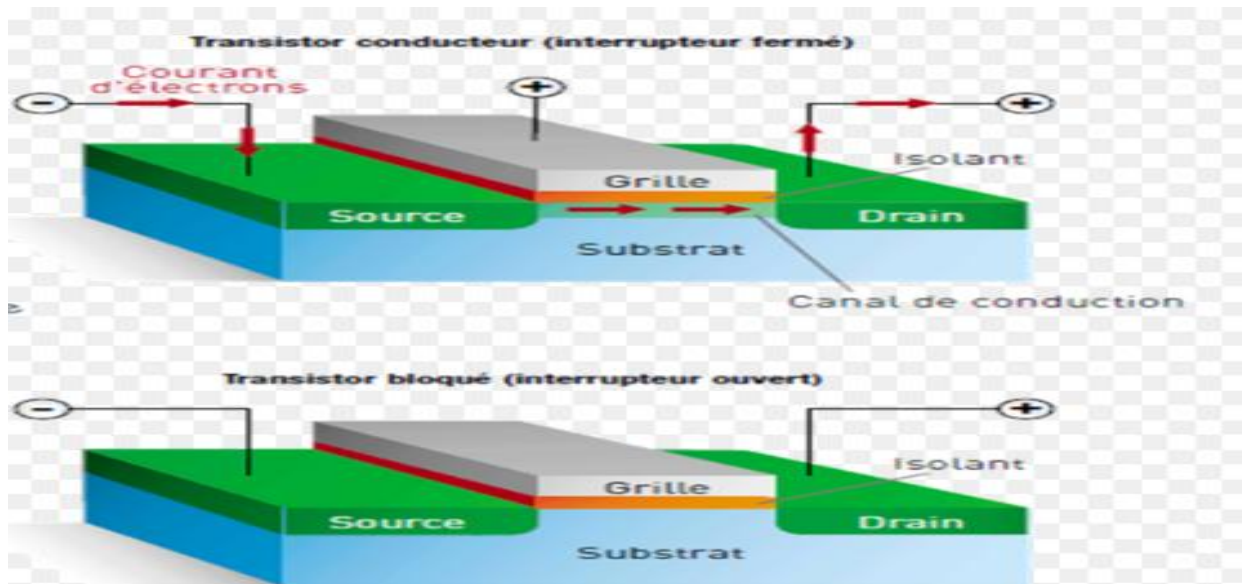


Figure II.7 : courant de fuites

#### IV.4. La puissance totale :

La puissance totale dissipée par un inverseur est :

$$P_{\text{moyenne}} = P_{\text{commutation}} + P_{\text{court-circuit}} + P_{\text{fuite}} \quad (\text{II.15})$$

Les études bibliographiques montrent que la consommation due à la puissance statique ne représente en moyenne que quelques femto-ampère (fA :  $10^{-15}$ ) de la consommation globale d'un circuit, de plus il est mentionné que la puissance de court-circuit représente 20% à 30% de la consommation dynamique, et que la puissance de commutation représente 70% à 80% de la consommation globale d'un circuit dans de bonnes conditions.

Ces remarques justifient notre choix de négliger la puissance statique dans toute la suite de nos travaux.

La puissance court-circuit représente 10% de la puissance globale pour une technologie adaptée, aussi elle est en général négligée.

Finalement, on approxime la puissance totale par :

$$P_{\text{total}} \approx P_{\text{dynamique}} \approx P_{\text{commutation}} \approx \alpha f C_{\text{ch}} V_{\text{dd}}^2 \quad (\text{II.16})$$

On voit dans (II.16) qu'il existe quatre paramètres pour diminuer l'énergie consommée et toutes les techniques de réduction de la puissance dynamique s'attaquent à l'un ou l'autre de ces facteurs. Le terme  $\tau$  dépend des données traitées et de la technique de codage utilisée,  $C_{ch}$  est une caractéristique du circuit utilisé, réduire la fréquence  $f$  sans modifier la tension sera sans effet au niveau de la consommation car, globalement, le temps nécessaire pour terminer une même séquence de code augmente d'un facteur  $k$  si l'on réduit la fréquence d'un même facteur  $k$ . Il est finalement possible de diminuer la tension  $V_{dd}$  mais fréquence et voltage sont liés par la relation :

$$f = \frac{(V_{dd}-V_s)^\alpha}{C_1 \times V_{dd}} \quad (\text{II.17})$$

On peut minimiser l'énergie consommée en utilisant certaines méthodes. Dans la suite, on va présenter quelques techniques de réduction de cette dernière.

#### IV.5. Technique de réduction de la consommation énergétique :

Dans cette partie, nous faisons un tour d'horizon des techniques de réduction de la consommation en énergie, le lecteur pourra se référer à [12] pour un développement plus complet sur ce sujet.

##### IV.5.1. Au niveau technologique (consommation dynamique et statique) :

Diverses optimisations sont envisagées, comme la puissance statique qui représente moins de 15% de la consommation de la puissance dynamique d'après [31], donc on la néglige. Le problème de la maîtrise de la consommation est très complexe, de nombreux paramètres sont interdépendants. L'équation de  $P_{\text{dym}}$  fait apparaître plusieurs degrés de liberté permettant de réduire la consommation d'un système :

- La réduction de la tension d'alimentation résulte en une amélioration quadratique de la dissipation de puissance (II.16). Par contre, l'effet négatif est une perte de performances temporelles. En effet, diminuer la tension d'alimentation affecte le temps de propagation d'une porte CMOS, une approximation du premier ordre de ce temps  $T$  est donnée par

$$T = \frac{C_{ch} \times V_{dd}}{(V_{dd} - V_s)^\alpha} \quad (\text{II.18})$$

Avec :  $\alpha \in [1, 2]$

Il faudra cependant rester avec  $V_{dd} > 2.V_s$ , pour éviter une augmentation exponentielle du temps de propagation ayant un effet néfaste sur le paramètre  $f$ .

- La capacité physique : elle est décomposée en une partie venant des cellules CMOS et une autre provenant des interconnexions. Dans les nouvelles technologies submicroniques, les deux parties sont à considérer, leur réduction doit donc mettre en œuvre des techniques principalement au niveau physique de la conception (taille des transistors, placement / routage).
- La fréquence d'horloge : peut être améliorée en mettant en œuvre des techniques d'optimisations du chemin critique logique, ou bien des méthodes (parallélisme, pipeline, ...) aux niveaux algorithmique et architectural, en général ce paramètre est lié à l'optimisation de  $V_{dd}$ .
- L'activité de commutation du circuit : ce dernier paramètre montre que même un circuit très complexe ne consomme que s'il est en activité, cette réduction peut être effectuée à plusieurs niveaux. Au niveau logique, différents styles évitant les glitches, donc les commutations inutiles peuvent être envisagées. Une machine d'état peut également être optimisée au regard de son activité. Le codage des données, leur multiplexage, des techniques de mise en veille aux niveaux logique, architectural ou même système, peuvent être utilisées.

Par ailleurs, réduire  $V_{dd}$  conduit à baisser  $V_s$ . On constate une légère augmentation du courant de fuite et donc la puissance statique. Les technologies futures offrent bien sûr des avancées mais le courant de fuite est augmenté, il devient alors nécessaire de prendre en compte la puissance statique pour ces technologies, cependant, les techniques d'estimation et d'optimisation au niveau de système n'en seront pas bouleversées. On peut aussi essayer de diminuer les capacités, c'est-à-dire globalement la taille du circuit. Une dernière possibilité est de tenter de réduire l'activité de commutation du circuit par la réduction de commutations parasites et par la mise en veille des portes du circuit qui ont une activité inutile.

#### IV.5.2. Techniques matérielles :

Une première stratégie est de travailler sur la technologie des composants matériels, ainsi une diminution de la taille des composants, rendue possible par des progrès dans les techniques de fabrication, permet une tension d'alimentation plus faible et donc une consommation amoindrie. Il est également possible de limiter l'alimentation d'un composant aux blocs nécessaires pour le traitement en cours, par exemple, on peut diviser une mémoire cache en des blocs pouvant être activés indépendamment les uns des autres. Une autre possibilité est de limiter le nombre de changements d'états dans un circuit car chaque changement d'état induit un coût énergétique.

Une seconde stratégie est d'intervenir au niveau de l'architecture matériel, par exemple en remplaçant un disque dur gourmand en énergie du fait de son système mécanique par une mémoire flash. Le dimensionnement de l'architecture matériel est également important, ainsi il s'agit de trouver la bonne taille pour la ou les mémoires caches sachant que plus elles sont de grande taille plus elles consomment. Une autre voie qui est explorée est de spécialiser les composants pour l'usage fait par exemple à l'aide de composants reconfigurables FPGA [34]. Enfin, certains travaux étudient l'utilisation de circuits électroniques asynchrones qui contrairement aux circuits synchrones traditionnels, présentent la caractéristique intéressante de ne consommer de l'énergie que dans les sous-parties du circuit réellement utilisées lors de l'exécution d'une instruction.

#### IV.5.3. Techniques logicielles :

Le logiciel a également un rôle important à jouer pour minimiser la consommation en énergie, plusieurs mesures peuvent également être prises. Il est par exemple possible d'optimiser le code en remplaçant les opérations mémoire à mémoire par des opérations registre à registre, ce qui limite le nombre d'accès aux mémoires et diminue donc la consommation d'énergie.

On peut aussi optimiser le code en limitant le nombre d'appel de fonctions qui est une opération souvent longue et coûteuse, pour ce faire, certains langages comme le C permettent de faire de l'inlining, c'est-à-dire de recopier le contenu d'une fonction en lieu et place de l'appel. A nouveau, un certain compromis existe entre la complexité du code et la place qu'il prend en mémoire. L'utilisation de cette technique peut faire grossir considérablement la taille du code et il se peut qu'il ne soit dès lors plus possible d'utiliser de la mémoire cache pour le contenir.

#### IV.5.4. Technique hybrides :

Il existe naturellement des techniques dites hybrides basées sur une collaboration entre composants matériels et logiciels, par exemple des stratégies de mise en veille plus ou moins profondes de composants, ou d'adaptation du voltage du processeur, et donc de la fréquence, au besoin courant de l'application en termes de performances. Cette dernière classe de techniques permet des réductions de consommation importantes car, sans considérer la puissance statique, l'énergie consommée varie au minimum en le carré du voltage dans les technologies CMOS actuelles.

#### IV.5.5. Technique dynamique de la tension : (Dynamique Voltage Scaling « DVS ») :

La technique de DVS est une technique qui a déjà fait ses preuves et nous proposons d'estimer le profil de puissance d'un système embarqué et de réduire la consommation d'énergie dans un circuit CMOS. La méthode DVS permet de diminuer la puissance dissipée par une tâche en diminuant la tension d'alimentation appliquée à la ressource qui exécute cette tâche. Les idées présentées par Weiser et al [28], forment les bases de ces algorithmes, le temps d'inactivité du processeur doit être minimisé en réduisant la fréquence de traitement (la vitesse du processeur lors du traitement) de ce dernier. La réduction de la tension est réalisée par la technique de DVS permet effectivement d'obtenir une réduction de 80% de la puissance consommée. [11].

Cette technique est cependant très intéressante car il est possible de choisir une tension d'alimentation pour que la vitesse soit suffisante pour atteindre les dates d'échéance des applications qui sont à exécuter. Il est alors nécessaire que le système utilise le profil de l'application pour contrôler l'énergie nécessaire en contrôlant la tension d'alimentation [31].

#### IV.5.6. Algorithmes génétique :

Les algorithmes génétiques (AG) sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et des mécanismes d'évolution de la nature. Cependant, les processus naturels auxquels ils font référence sont beaucoup plus complexes. On parlera ainsi d'individu dans une population, il est représenté par un chromosome constitué de gènes qui contiennent les caractères héréditaires de l'individu. Les principes de sélection, de croisement, de mutation s'inspirent des processus naturels de même nom. Pour un problème d'optimisation donné, un individu représente un point de l'espace d'états, une solution potentielle. On lui associe la valeur du critère à optimiser, son adaptation, on génère

ensuite de façon itérative des populations d'individus sur lesquelles on applique des processus de sélection, de croisement et de mutation. La sélection a pour but de favoriser les meilleurs éléments de la population pour le critère considéré (les mieux adaptés), le croisement et la mutation assurent l'exploration de l'espace d'état.

Un algorithme génétique recherche le ou les extrema d'une fonction définie sur un espace de données. Pour l'utiliser, on doit disposer des cinq éléments suivants :

- 1) Un principe de codage de l'élément de population : cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données, elle se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traité. La qualité du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétiques. Les codages binaires ont été très utilisés à l'origine. Les codages réels sont désormais largement utilisés, notamment dans les domaines applicatifs pour l'optimisation de problèmes à variables réelles.
- 2) Un mécanisme de génération de la population initiale : ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix de la population initiale est important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global. Dans le cas où l'on ne connaît rien du problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche.
- 3) Une fonction à optimiser : celle-ci retourne une valeur appelée fitness ou fonction d'évaluation de l'individu.
- 4) Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population, l'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'états.
- 5) Des paramètres de dimensionnement : taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation.

#### **IV.5.6.1. Opérateurs génétiques :**

- Sélection : processus où les individus sont copiés selon la valeur de leur fonction objectif. On peut décrire la fonction  $f$  comme une mesure de profit, utilité ou qualité que l'on veut minimiser ou maximiser. Si on copie des individus selon leur valeur  $f$ , ceci implique que les individus ayant des valeurs plus élevées ont une plus grande

probabilité de contribuer des rejets à la prochaine génération. Ceci correspond à une version artificielle de la "survie des plus forts" (survival of the fittest) de Darwin. [13]

- Croisement : processus où de nouveaux individus sont formés à partir des parents. Ces nouveaux individus, les rejets, sont formés en effectuant un croisement entre deux parents. On choisit une position aléatoire  $k$  entre  $[1, L - 1]$  où  $L$  est la longueur de l'individu. Le croisement se fait en échangeant les bits de la position  $k + 1$  à  $L$ .
- Mutation : processus aléatoire où un bit change de valeur, ce processus joue un rôle secondaire dans l'algorithme génétique, mais il est quand même important. La mutation assure qu'aucun point dans l'espace de recherche n'a une probabilité nulle d'être atteint. [13]

Le grand avantage des algorithmes génétiques est qu'ils parviennent à trouver de bonnes solutions sur des problèmes très complexes, et trop éloignés des problèmes combinatoires classiques pour qu'on puisse tirer profit de certaines propriétés connues. Ils doivent simplement déterminer entre deux solutions quelle est la meilleure, afin d'opérer leurs sélections, on les emploie dans les domaines où un grand nombre de paramètres entrent en jeu, et où l'on a besoin d'obtenir de bonnes solutions en quelques itérations seulement dans les systèmes de régulation, de transport en temps réel par exemple.

Le but des AG est de déterminer les extrêmes d'une fonction  $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ , où  $X$  est un ensemble quelconque appelé espace de recherche et  $f$  est appelée fonction d'adaptation ou fonction d'évaluation ou fonction objectif ou encore fonction fitness, ils fournissent des solutions proches de la solution optimale à l'aide des mécanismes de sélection, croisement et de mutation. Ils sont applicables à de nombreux problèmes, dont le problème d'optimisation d'énergie dans un processeur.

### **V. La réduction de la consommation d'énergie d'un processeur :**

Pour atteindre cet objectif, il existe deux problèmes dont nous devons gérer : la rapidité de traitement des tâches et la façon de commander les tâches, d'une manière à satisfaire toutes les contraintes temporelles.

La structure de ce problème conduit à des propriétés intéressantes, tel que la convexité de la fonction objective qui est la consommation énergétique, que nous exploitons pour formuler la fonction à optimiser (fonction objectif) qui soumise à des contraintes temporelles

basées sur les caractéristiques des tâches (date d'activation, échéance ...etc.). Le problème qu'on doit traiter est hors-ligne avec des tâches préemptives et apériodiques.

On dit qu'une fonction  $f: K \rightarrow \mathbb{R}$ , définie sur un ensemble convexe  $K$  (c-à-d :  $K \subset \mathbb{R}^n$  est dit convexe si pour tout couple  $x, y \in K$  et  $\forall \lambda \in [0, 1]$  on a :  $\lambda x + (1 - \lambda) y \in K$ ) est convexe si elle vérifie :

$$\forall x, y \in K, \forall \lambda \in [0, 1], f(\lambda x + (1 - \lambda) y) \leq \lambda f(x) + (1 - \lambda) f(y) \quad (\text{II.19})$$

On dira que  $f$  est strictement convexe si :

$$\forall x, y \in K, x \neq y, \forall \lambda \in [0, 1], f(\lambda x + (1 - \lambda) y) < \lambda f(x) + (1 - \lambda) f(y) \quad (\text{II.20})$$

Notre approche est indépendante de la politique de planification, car une fois que la politique de décision de l'ordre des tâches sont sélectionnées, nous pouvons réparer l'ordre de traitement des tâches et modéliser leur dynamique de mise en file d'attente à travers l'équation standard de Lindley [9] comme suit :

$$x_i = \max(x_{i-1}, a_i) + \mu_i \tau_i \quad (\text{II.21})$$

Avec  $a_i \leq x_i \leq d_i$

Tel que :

$x_i$  : L'instant de départ de la tâche  $i$  ;

$d_i$  : Délai de la tâche  $i$  (deadline) ;

$a_i$  : L'instant d'arriver de la tâche  $i$  ;

$\mu_i$  : Nombre de coup de l'horloge qu'il faut pour réaliser une tâche ;

$\tau_i$  : Temps de traitement d'une tâche ;

Nous pouvons maintenant nous concentrer sur le premier problème ci-dessus, c'est-à-dire contrôler le taux de traitement des tâches afin de minimiser une fonction de consommation d'énergie tout en veillant à ce que toutes les échéances des tâches soient satisfaites. Dans le problème hors ligne, les temps d'arrivée des tâches et leurs délais associés sont connus.

Ainsi, nous formulons un problème d'optimisation non linéaire à horizon fini déterministe auquel on se référera dans la suite du problème  $J$ :

$$\min_{T_1, \dots, T_N} \left\{ J = \sum_{i=1}^N \mu_i \tau_i(T_i) \right\} \quad (\text{II.22})$$

Sujet à :

$$x_i = \max_{a_i, \mu_i T_i} x_{i-1}, a_i + \mu_i T_i, i=1, \dots, N$$

$$a_i \leq x_i \leq d_i \quad i=1 \dots N$$

$$T_{min} \leq T_i \leq T_{max}$$

Avec :

N : nombre total des tâches,

$T_i$  : Temps de traitement de la tâche i,

$T_{max}$  : Temps de traitement maximal,

$T_{min}$  : Temps de traitement minimal,

$\theta(T_i)$  : Fonction de consommation énergétique.

### V.1.Fonction de consommation énergétique (fonction objectif) :

La consommation d'énergie totale  $E_{total}$  dans les processeurs CMOS comprend essentiellement deux parties :

- La consommation d'énergie dynamique  $E_{dyn}$  causée par la tension d'alimentation  $V_{dd}$
- La consommation d'énergie statique  $E_{statique}$  causée par les courants de fuite.

Alors la consommation d'énergie consommée par le circuit peut être donnée par :

$$E_{total} = E_{dynamique} + E_{statique} ; \quad E_{dynamique} = C_{ch} \times V_{dd}^2 \quad (II.23)$$

$C_{ch}$  étant la capacité totale commutée et  $V_{dd}$  la tension d'alimentation, pour réduire l'énergie consommée par le circuit, il est possible de diminuer la capacité totale du circuit ou bien la tension d'alimentation en utilisant les techniques abordées dans la partie précédente.

La fréquence de traitement (la vitesse du processeur lors du traitement d'une tâche) est donnée par :

$$f = \frac{(V_{dd} - V_s)^\alpha}{C_1 \times V_{dd}} \quad (II.24)$$

Où:

$C_1$  et  $\alpha \in [1, 2]$  sont des composantes dépendantes de la caractéristique de dispositif.

$V_s$  : la tension de seuil, de tel sorte que  $V_{dd} > V_s$

pour  $\alpha = 1$ , on détermine l'expression de  $V_{dd}$  :

$$\text{on a:} \quad f = \frac{V_{dd} - V_s}{C_1 \times V_{dd}} \quad (\text{II.25})$$

$$\text{et:} \quad T_i = \frac{1}{f_i} = \frac{C_1 V_{dd}}{V_{dd} - V_s} = h(V_{dd}) \quad (\text{II.26})$$

$$\text{Donc:} \quad V_{dd} = \frac{T_i V_s}{T_i - C_1} \quad T_i \neq C_1 \quad (\text{II.27})$$

à partir de (II.26) on a :

$$\begin{cases} h(V_{dd}) = T_i \\ h^{-1}(T_i) = V_{dd} \end{cases}$$

Pour démontrer que  $h^{-1}(T_i)$  est convexe et monotone il suffit de prouver que  $h(V_{dd})$  est convexe monotone :

pour tout :  $T_1, T_2 \in \mathbb{R}$  et  $S \in [0, 1]$

$$\text{alors :} \quad S T_1 + (1 - S) T_2 \in \mathbb{R}$$

Vérification de la convexité de  $h(V_{dd})$  :

$$\begin{aligned} S T_1 + (1 - S) T_2 &= S h(h^{-1}(T_1)) + (1 - S) h(h^{-1}(T_2)) \\ &\geq h[S h^{-1}(T_1) + (1 - S) h^{-1}(T_2)] \end{aligned} \quad (\text{II.28})$$

Puisque  $h(V_{dd})$  est monotone, alors  $h^{-1}(T_i)$  est également monotone, ce qui implique pour tout  $\beta \in [0, 1]$  :

$$\begin{aligned}
h^{-1}(sT_1 + (1-s)T_2) &\leq h^{-1}(h(s h^{-1}(T_1) + (1-s) h^{-1}(T_2))) \\
&= s h^{-1}(T_1) + (1-s) h^{-1}(T_2) \quad (\text{II.29})
\end{aligned}$$

Donc

$$T_i = h(V_{dd}) = \frac{C_1 V_{dd}}{V_{dd} - V_s} \iff h^{-1}(T_i) = V_{dd} = \frac{T_i V_s}{T_i - C_1} \quad (\text{II.30})$$

Pour obtenir la fonction de consommation d'énergie  $\theta(T_i)$  qu'il s'agit d'une fonction strictement convexe de  $T_i$  (temps de traitement) et monotone décroissante, on utilisant les relations (II.23) et (II.30) à partir de laquelle nous pouvons écrire :

$$\theta(T_i) = E_{total} = C_{ch}(h^{-1}(T_i))^2 + E_{statique} \quad (\text{II.31})$$

$$\theta(T_i) = C_{ch} \cdot \left( \frac{T_i V_s}{T_i - C_1} \right)^2 + E_{statique}$$

La consommation  $\theta(T_i)$  n'est généralement pas convexe ou monotone décroissant à cause de la présence de  $E_{statique}$  qui augmente en diminuant  $V_{dd}$ . Cependant il existe une limite de fonctionnement inférieure  $V_{min}$  et supérieure  $V_{max}$  sur  $V_{dd}$  tels que  $E_{statique}$  peut être considéré comme une petite constante par rapport à l'énergie dynamique  $E_{dyn}$ , donc on peut la négliger c-à-d l'énergie totale prend la forme suivante :

$$E_{total} = \theta(T_i) = C_{ch} \cdot \left( \frac{T_i \cdot V_s}{T_i - C_1} \right)^2$$

Puisque  $h^{-1}(T_i)$  est strictement convexe et monotone décroissante par rapport à  $T_i$ ,  $\theta(T_i)$  est convexe et une fonction monotone décroissante en  $T_i$  avec la limite supérieure  $T_{max}$  et la limite inférieure  $T_{min}$  correspondante exprimée comme suite :

$$T_{max} = \frac{C_1 V_{min}}{V_{min} - V_s} \quad (\text{II.32})$$

$$T_{\min} = \frac{C_1 V_{\max}}{V_{\max} - V_s} \quad (\text{II.33})$$

On résume :  $T_{\min} \leq T_i \leq T_{\max}$

### V.2.Développement du problème :

On travaille avec 3 tâches (N=3), avec  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 1$ , c-à-d un coup d'horloge pour l'ensemble de tâches.

Après avoir déterminé la fonction objectif ( $T_i$ ), les variables de décision et les contraintes, le problème d'optimisation correspond à un problème non linéaire, suite à la présence de l'opérateur non linéaire « max ». le problème est développé comme suit :

$$\min_{T_1 \dots T_N} \left\{ (T_i) = C_{ch} \cdot \left[ \left( \frac{T_1 \cdot V_s}{T_1 - C_1} \right)^2 + \left( \frac{T_2 \cdot V_s}{T_2 - C_1} \right)^2 + \left( \frac{T_3 \cdot V_s}{T_3 - C_1} \right)^2 \right] \right\}$$

Sujet à :

$$x_1 = \max(x_0, a_1) + T_1$$

$$x_2 = \max(x_1, a_2) + T_2$$

$$x_3 = \max(x_2, a_3) + T_3$$

$$a_1 \leq x_1 \leq d_1$$

$$a_2 \leq x_2 \leq d_2$$

$$a_3 \leq x_3 \leq d_3$$

$$T_{\min} \leq T_1 \leq T_{\max}$$

$$T_{\min} \leq T_2 \leq T_{\max}$$

$$T_{\min} \leq T_3 \leq T_{\max}$$

Le problème est sous la forme suivante :

$$\min_x f(x)$$

S à:

$$X_i = \max(x_{i-1}, a_i) + X_{3+i}$$

$$Lb \leq X \leq Ub$$

Avec :

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{pmatrix} ; \quad Lb = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ T_{\min} \\ T_{\min} \\ T_{\min} \end{pmatrix} \quad \text{et:} \quad Ub = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ T_{\max} \\ T_{\max} \\ T_{\max} \end{pmatrix}$$

### V.3.Programme sous Matlab :

Puisque le problème d'optimisation est non linéaire, avec des tâches non préemptifs et apériodiques (on connaît leurs dates d'activation et leurs deadline), on prend  $a_i$  et  $d_i$  d'une manière à satisfaire toutes les contraintes. Pour répondre au problème de minimisation d'énergie consommée, on diminue la tension d'alimentation qui agit sur la fréquence de fonctionnement.

Les dates d'arrivée des 3 tâches sont données par :

$$a = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ 5 \end{pmatrix}$$

Les deadlines (échéances) des 3 tâches sont données par :

$$d = \begin{pmatrix} 15 \\ 20 \\ 35 \end{pmatrix}$$

Pour un bon fonctionnement, on a choisi les valeurs suivantes pour les différents paramètres :

$C_{ch}=1$ ,  $C_1=0.1$  et  $V_s=0.5$ . Le programme qui permet de répondre à ce problème d'optimisation est programmé sous Matlab en utilisant l'algorithme génétique.

### V.3.1. Résultats de simulation

Après avoir simulé le programme sur Matlab en utilisant l'algorithme génétique, nous avons obtenu les résultats suivants :

		Tache 1		Tache 2		Tache 3	
$V_{max}(\text{volts})$	$V_{min}(\text{volts})$	$x_1$	$T_1$	$x_2$	$T_2$	$x_3$	$T_3$
4	0.8	0.5702	0.5702	3.6578	0.6578	5.5409	0.5409
3	0.8	0.6881	0.6881	3.7360	0.7360	5.7755	0.7755
2	0.8	0.7983	0.7983	3.7817	0.7817	5.7975	0.7975

Tableau II. 1 : Dates de départs et les temps de traitements des 3 tâches après simulation

Le Tableau (2) illustre l'évolution de l'énergie consommée en fonction de la variation de la tension d'alimentation.

Tension d'alimentation (v)	Energie consommée (joule)
4.0000	4.5954
3.0000	4.4017
2.0000	4.3811

Tableau II.2 : l'évolution de  $\theta(T_i)$  en diminuant  $v_{dd}$

### V.3.2. Interprétation des résultats de simulation

Pour ce faire on doit vérifier le respect des contraintes posées

On vérifie les contraintes pour  $V_{max}=4$

$$a_1 + T_1 - x_1 = 0 \rightarrow 0 + 0.5702 - 0.5702 = 0 \quad (\text{Vérifiée})$$

$$\max(x_1, a_2) + T_2 - x_2 = 0 \rightarrow 3 + 0.6578 - 3.6578 = 0 \quad (\text{Vérifiée})$$

$$\max(x_2, a(3)) + T_3 - x_3 = 0 \rightarrow 5 + 0.5409 - 5.5409 = 0 \quad (\text{vérifiée})$$

$$a_1 \leq x_1 \leq d_1 \rightarrow 0 \leq 0.5702 \leq 15 \quad (\text{Vérifiée})$$

$$a_2 \leq x_2 \leq d_2 \rightarrow 3 \leq 3.6578 \leq 20 \quad (\text{Vérifiée})$$

$$a_3 \leq x_3 \leq d_3 \rightarrow 5 \leq 5.5409 \leq 35 \quad (\text{Vérifiée})$$

on fait la même chose pour  $V_{max} = 3$  et  $V_{max} = 2$ . Après avoir vérifié toutes les contraintes on remarque que les résultats étaient positifs.

En observant le tableau (II. 2), on conclut qu'en diminuant la tension, le temps de traitement augmente et l'énergie consommée diminue.

#### Remarque :

D'après la relation ( $T = \frac{1}{f} = \frac{(V_{max}-V_t)}{C_2 \times V_{max}}$ ) on remarque qu'en diminuant la tension, le temps de traitement augmente et la fréquence de fonctionnement diminue, ce qui fait que la consommation d'énergie diminue.

Le problème qu'on a résolu consiste non seulement à déterminer l'ordre dans lequel exécuter les tâches du système mais aussi à fixer la fréquence de fonctionnement du processeur au cours du temps.

**VI. Conclusion :**

Ce chapitre nous a permis de rappeler les différentes sources de consommation énergétique liées à la technologie CMOS des processeurs qui comprend essentiellement deux parties l'énergie dynamique et l'énergie statique.

Diverses techniques d'optimisation sont abordées afin de minimiser cette consommation. Leurs utilisations permettent d'obtenir une diminution importante de la consommation énergétique due aux traitements effectués.

Enfin de ce chapitre nous avons mis au point un algorithme génétique afin de réduire l'énergie consommée d'un processeur d'une manière à satisfaire toute les contraintes temporelles en faisant diminuer sa tension d'alimentation et sa fréquence de fonctionnement. Nous avons conclu que :

- On diminuant la tension, le temps de traitement augmente ce qui fait que la fréquence diminue et la consommation d'énergie diminue.
- Le problème qu'on a résolu consiste non seulement à déterminer l'ordre dans lequel exécuter les tâches du système mais aussi à fixer la fréquence de fonctionnement du processeur au cours du temps.

# Chapitre III

## I. Introduction :

Le transport occupe une place prépondérante dans les consommations d'énergie. La consommation totale d'énergie pour ce secteur est, en outre, en constante croissance, elle a presque doublé en l'espace de 25 ans. Le transport routier occupe la première place en termes de consommation devant le transport aérien, ferroviaire, en 2010, il représente à lui seul 85% de la consommation totale d'énergie du transport. [40]

Face à ces problèmes, il est nécessaire de disposer un outil de modélisation et d'analyse qui permet d'évaluer les performances de ces systèmes pour l'amélioration de la qualité de service. Comme les systèmes de transport que nous étudions sont de type à événement discrets. Pour les modéliser, nous utilisons, en l'adaptant, une sous classe de l'outil réseaux de Petri : les graphes d'événement temporisés (GET).

Le travail présenté dans ce chapitre propose un modèle mathématique pour un réseau de transport, où il permet de modéliser le déplacement d'un moyen de transport (bus) circulant sur chaque ligne de réseau. Le modèle permet d'analyser son mouvement et son déplacement d'un point d'arrêt à un autre en tenant compte le changement de sa vitesse, afin de minimiser au mieux l'énergie et les temps d'attente des passagers dans les stations de correspondance.

## II. Nature des énergies utilisant dans les transports :

Un moyen de transport utilise une source d'énergie qui est transformé en énergie mécanique pour assurer le déplacement du véhicule.

Les énergies le plus souvent utilisées aujourd'hui sont :

- Les énergies fossiles : issues de la décomposition des végétaux (pétrole, gaz, charbon) sont les sources d'énergie les plus utilisées dans les transports (bus, camion, bateau, ...etc).
- L'énergie électrique : le TGV, le métro, ...etc sont des moyens de transport qui fonctionne à base de l'électricité.
- L'énergie musculaire : est un travail fourni par les muscles (activité physique) comme le pédalage de vélo, la marche ...etc.

Cette chaîne d'énergie comprend essentiellement quatre fonctions techniques :

1-Alimenter ou stocker l'énergie avec des réservoirs ou des batteries.

2-Distribuer l'énergie avec des tuyaux ou des fils électriques, ainsi qu'un accélérateur qui permet à l'utilisateur de doser la quantité d'énergie distribuée pour réguler la vitesse du véhicule.

4-Transformes l'énergie fournie en énergie mécanique avec un moteur (énergie motrice).

5- Transmettre l'énergie à travers un ensemble d'éléments pour déplacer le véhicule.

### III. Transformations de l'énergie dans un moyen de transport :

Les différentes transformations d'énergie produites dans un moyen de transport (exp : une voiture) sont les suivantes :

- L'énergie chimique de l'essence et de l'air est transformée en chaleur par combustion. Celle-ci est transmise, par la production de gaz chauds, aux cylindres, puis aux pistons. À ce stade, elle se transforme en énergie mécanique et déclenche le mouvement de la voiture, qui acquiert une certaine énergie cinétique.
- Les frottements de l'air sur la carrosserie et des roues sur le sol transforment intégralement cette énergie en chaleur (en terrain plat et à vitesse constante).
- Une partie de l'énergie issue du moteur est convertie en énergie électrique, alimentant un alternateur. Le courant ainsi engendré sert à produire les étincelles dans les bougies, pour enflammer le combustible, et à recharger la batterie dont l'énergie chimique augmente, il sert aussi à allumer les phares pour émettre de l'énergie lumineuse. On consomme donc, à une vitesse donnée, un peu plus d'essence de nuit que de jour.[4]

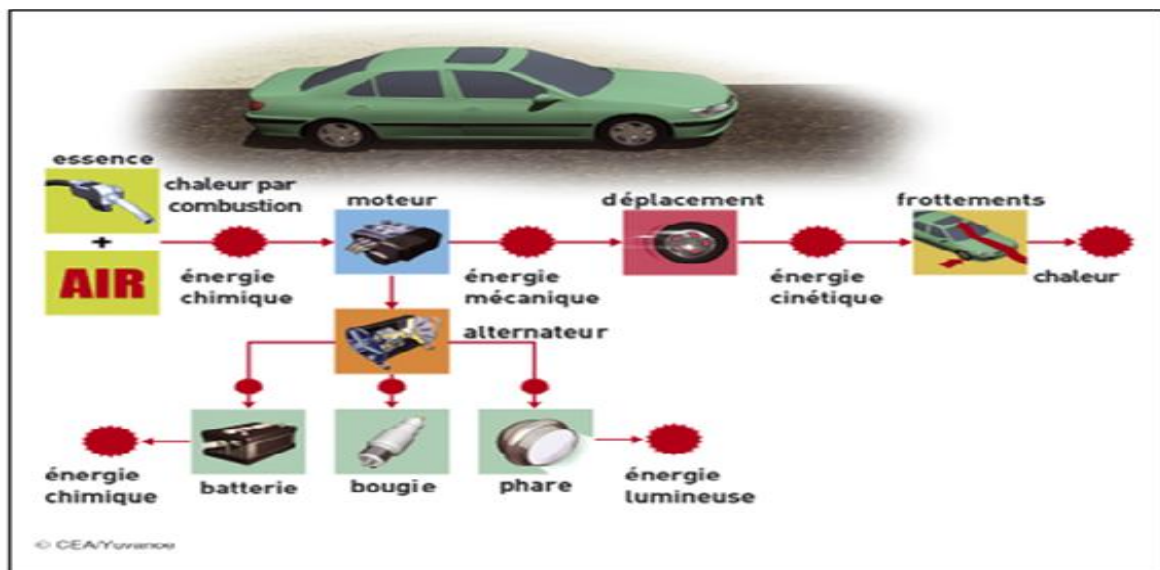


Figure III.1 : Les différentes transformations d'énergie produites dans une voiture.

#### **IV. Source de consommation énergétique d'un moyen de transport :**

La consommation du véhicule dépend de plusieurs facteurs qui peuvent relever de trois catégories en lien avec le moyen de transport, les conditions opérationnelles d'exploitation, et le conducteur.

##### **IV.1. Les paramètres relatifs au moyen de transport :**

Sont l'aérodynamique du véhicule, le moteur, le système de transmission, les systèmes électroniques (processeur...), les pneumatiques (résistance au roulement), les systèmes supplémentaires (climatisation, GPS...). Les études de l'ADEME et de l'ENERGECO [4] identifient ces facteurs comme des sources potentielles de surconsommation carburant d'un moyen de transport, le fait de ne pas entretenir le moteur expose le propriétaire aux risques d'affronter des pannes coûteuses et d'entraîner une importante surconsommation de carburant. Un sous-gonflage des pneus entraîne une augmentation de la résistance au roulement et donc une surconsommation d'énergie (une surconsommation d'environ 1,2% pour un sous-gonflage de 0,3 bar). Ou encore, le fait d'augmenter la résistance aérodynamique du véhicule avec une galerie (ou des barres de toit), même à vide, peut augmenter la consommation de 10% ce chiffre peut atteindre les 15% (100km/h supplémentaire à 120 km/h) une fois la galerie chargée. Un dernier exemple concerne l'utilisation d'équipements supplémentaires, qui semble extrêmement coûteuse en énergie. L'intégration des systèmes complexes pour améliorer la sécurité et le confort induit donc une consommation supplémentaire. Quand elle fonctionne, la climatisation augmente la consommation d'énergie de 6% sur autoroute. [4]

##### **IV.2. L'ensemble des facteurs liés aux conditions d'exploitation opérationnelle d'un moyen de transport :**

Ils comprennent le type de trajet (urbain, interurbain dont une des caractéristiques est la fréquence des arrêts), le type de route (montagne, planéité, sinuosité, ...), les conditions du trafic, la géométrie de la route (la pente, la rugosité...). Même si peu d'études quantifient la différence de consommation entre différents types de trajets, on se doute bien que la consommation n'est pas la même sur une route plane et sur une route avec relief, de même entre une route droite et une route avec des virages fréquents. Une augmentation de 15 à 20% de la consommation d'énergie en hiver par rapport à l'été est notée en Europe. Finalement, la consommation dans un embouteillage s'avère très élevée par rapport à la consommation en trafic fluide.

### IV.3. Le conducteur :

En plus de la maintenance de son véhicule, conduite peut engendrer des surconsommations non négligeables. On constate que la conduite agressive (accélération et décélération brutales) en situation de congestion est estimée engendrer une augmentation de 10% de la consommation. De même, avec la vitesse et la transmission, la variation entre conducteurs peut atteindre 20% due à la différence de l'utilisation des boîtes de vitesse[4]. Les véhicules d'aujourd'hui connaissent beaucoup de changement par rapport aux générations précédentes, et par conséquent, le conducteur doit lui aussi adapter sa conduite à la performance offerte par son véhicule. Cela fait partie de la tendance d'une conduite écologique qui d'après plusieurs études permet d'obtenir un gain de consommation de 15 à 20% en augmentant en même temps le confort et en diminuant aussi les risques d'accidents

Cependant des mesures récentes ont montré que pour un même moyen de transport, avec le même horaire, sur la même voie, il peut y avoir une énorme variation dans la consommation d'énergie selon la conduite adoptée par le conducteur

Finalement, il paraît clair que le développement des transports a une part de responsabilité dans le réchauffement climatique. Réduire la consommation et les émissions de ce secteur s'annonce comme une tâche difficile et un vrai défi pour tous les acteurs concernés.

Par la suite, on présente certaines mesures qui sont prises en compte pour contribuer à relever ce défi. [4]

### V. Solutions pour faire des économies d'énergie dans les transports :

Du fait de la complexité du problème, la solution ne peut être unique, elle se composera d'un ensemble de mesures qui feront appel à différentes technologies. Les paramètres accessibles pour réduire la consommation d'énergie finale sont d'une part la masse et l'accélération, d'autre part la vitesse et les qualités techniques des véhicules, et substituer aux systèmes existants des systèmes plus efficaces faisant peu ou pas appel aux énergies fossiles. La réduction de l'exigence énergétique consiste donc à travailler le rendement du système de propulsion, à modifier les caractéristiques du véhicule et à repenser les modes de déplacement.

On vous propose de passer en revue les différentes voies pour réduire la consommation des véhicules, on a fait un petit schéma très simplifié qui résume la problématique.

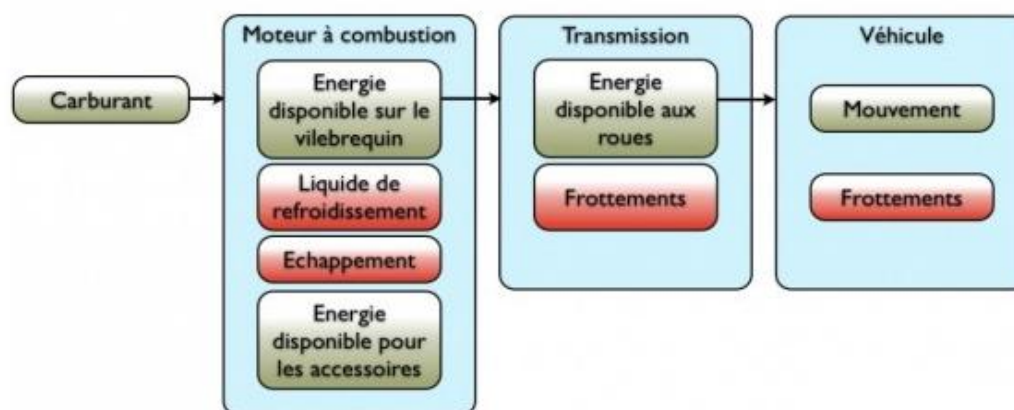


Figure III.2 : les différentes voies de la consommation d'énergie d'un moyen de transport

### V.1. Réduire la consommation du moteur :

La stratégie élaborée par les motoristes pour réduire la consommation des moteurs, c'est la réduction de leurs cylindrées, en effet plus on va réduire la taille du moteur plus celui-ci verra sa consommation chuter, cependant, et en toute logique, la puissance se verra réduite elle aussi.

Pour pallier à cette faiblesse, les motoristes ils ont intégré systématiquement un turbo mais aussi une injection à très haute pression

### V.2. Développer les véhicules hybrides et électriques :

Cela ajoute à la fois un degré de liberté pour faire fonctionner au mieux le moteur thermique et une capacité à récupérer l'énergie de freinage. Le véhicule électrique permet quant à lui de réduire les émissions à zéro. Son plus grand défaut actuel est son autonomie limitée et le manque d'infrastructures adaptées, mais il reste intéressant pour des courts trajets.

### V.3. Utiliser l'énergie présente dans le liquide de refroidissement et l'énergie des gaz d'échappement :

Les chercheurs ont développé un système qui permet de récupérer de l'énergie des gaz d'échappement pour réchauffer le liquide de refroidissement, permettre une chauffe du moteur plus rapide (très précieux pour le passage des normes d'émissions des polluants) et fournir de la chaleur rapidement à l'habitacle (utile dans les pays froids).

**V.4. Réduire la consommation de tous les accessoires :**

Ces derniers prélèvent de l'énergie sur le moteur, on retrouve l'alternateur, la pompe à huile, la ou les pompes à carburant, la pompe à eau, l'alternateur, le compresseur de climatisation

**V.5. Réduire la résistance au roulement :**

Les déformations de la bande de roulement des pneumatiques sont responsables de cette résistance au roulement. Les pneus « à économie d'énergie » développés par les manufacturiers ces dernières années permettent de réduire la part d'énergie dissipée de cette dernière.[29]

**V.6. Réduire la traînée aérodynamique :**

Pour pouvoir réduire la consommation il faut que la forme de la voiture soit au maximum aérodynamique, cela se mesure en "Cx" (traînée de pression) qui est l'unité qui mesure la résistance et la pénétration dans l'air d'une forme. Moins le Cx est élevé moins il y a de résistance, moins il y a de résistance moins il y a besoin d'énergie, moins il y a besoin d'énergie moins il a besoin de carburant.

Pour réduire la résistance dans l'air des véhicules, les constructeurs optimisent au maximum les formes de l'automobile, l'autre technique consiste à rabaisser la voiture (BMW utilise cette technique par exemple)

**V.7. Réduire le poids d'un moyen de transport :**

Plus un véhicule est lourd, plus il consomme de carburant, malgré tous les efforts déployés par les industriels, les véhicules ont une fâcheuse tendance à être de plus en plus lourds. Le poids moyen d'un véhicule a augmenté de 60% entre les années soixante et aujourd'hui, il y a évidemment des raisons à cela (normes de sécurité, exigences de confort), mais il faut reconnaître que ce fait n'est pas acceptable. Y a-t-il des solutions ? on pense que oui, mais elles sont difficiles à mettre en œuvre. Les « nouveaux matériaux », qui s'appuient sur l'utilisation de nanotechnologies, offrent des possibilités. Les fabricants automobiles investissent actuellement dans la recherche pour réduire le poids de leurs véhicules, principalement en remplaçant les matériaux métalliques par des matériaux composites plus légers.

**V.8. Récupération de l'énergie :**

Certains constructeurs mettent en place des systèmes qui permettent la récupération de l'énergie lors du freinage.

Lors du freinage, le système récupère l'énergie cinétique pour recharger les batteries, cela évite de le faire par le moteur et donc d'économiser un peu de carburant.

### **V.9.Des systèmes embarqués d'aide à la conduite (systèmes régulateurs de vitesse, systèmes de freinage, etc.) :**

Ils favorisent un mode de conduite plus économe en énergie (éco-conduite) et la sécurité des usagers ils font partie des Systèmes de Transport dits « Intelligents » (STI) qui utilisent les nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (TIC)

L'objectif des systèmes d'aide à la conduite écologique est de permettre au conducteur de maximiser son économie de carburant en le stimulant à adopter une conduite plus adaptée à son véhicule.

### **V.10.Éco-conduite**

Comme cité précédemment, le comportement du conducteur a une influence significative sur la consommation de carburant (énergie). Plusieurs études montrent qu'en changeant son style de conduite, le conducteur peut gagner de 15 à 20% de carburant.

L'éco-conduite est basée sur une sollicitation modérée du véhicule, qui doit être bien entretenu et adapté au besoin de son conducteur. Ce comportement se résume en un ensemble de règles de bonne conduite à apprendre. Ces règles varient en fonction du public ciblé et en fonction du pays.les règles sont :

1. Passer à la vitesse supérieure dès que possible.
2. Maintenir une allure constante : Enclencher la plus haute vitesse possible et conduire avec un régime moteur faible.
3. Anticiper le trafic : Regarder le plus loin possible et anticiper le trafic environnant.
4. Décélérer progressivement : S'il faut ralentir ou s'arrêter, décélérer progressivement
5. Vérifier régulièrement la pression des pneus.

### **VI.Quelques rappels :**

Dans cette section, on expose quelques définitions et rappels nécessaires au bon déroulement de notre travail

**VI.1. Puissance :**

Lors d'un processus, lorsque de l'énergie est échangée (dans un transfert) où modifiée (dans le cas d'une forme d'état), cela prend nécessairement un certain temps. La puissance prend en compte la dimension temporelle de l'échange d'énergie

Dans le cas d'une variation d'énergie d'état, la formule de la puissance est donnée par :

$$p(t) = \frac{dE_{total}}{dt} \quad (\text{III.1})$$

Avec

E :représente l'énergie (Joule)

Il un autre moyen de calculer la puissance, Il s'agit d'un travail effectué par intervalle de temps, c'est à dire une force ( $F$ ) qui s'exerce sur une distance pendant un temps donné, soit à une certaine vitesse. On peut donc utiliser la formule suivante :

$$P(t) = \vec{F} \cdot \vec{V} + P_{potentiel} \quad (\text{III.2})$$

Où

$\vec{F}$  : représente la force. (N)

$\vec{V}$  : représente la vitesse. (m/s)

$P_{potentiel} = 0$  (notre étude sur un trajet plat c-à-d :  $h=0$ ).

**VI.2. Énergie :**

C'est une grandeur physique qui ne se définit pas, on dira que l'énergie est ce qui permet à un système physique de se transformer ou de se déplacer.

Un système physique voit son énergie prendre des formes successives au cours de son évolution ou de sa transformation, l'énergie se présente en fait sous de nombreuses formes.

Citons quelques exemples :

- L'énergie potentielle gravitationnelle est liée au poids.
- L'énergie cinétique est liée au mouvement.
- L'énergie mécanique est la somme de l'énergie potentielle gravitationnelle et de l'énergie cinétique.
- L'énergie électrique est fournie par des piles ou par l'alternateur sous la boîte de pédalier.

**VI.2.1. L'énergie potentielle gravitationnelle :**

L'énergie de position (ou énergie potentielle) d'un objet de masse  $m$  est l'énergie qu'il possède du fait de son interaction avec la Terre. La valeur de cette énergie dépend de la position (ou altitude) de l'objet par rapport à la Terre. Cette formule est donnée par :

$$E_p = m \times g \times h \quad (\text{III.3})$$

$m$  : en kilogramme (kg)

$g$  : en newton par kilogramme (N/kg)

$h$  : altitude de l'objet par rapport à la terre en mètre (m)

**VI.2.2. L'énergie cinétique**

Tout corps en déplacement possède de l'énergie du seul fait de son mouvement, c'est l'énergie cinétique ou énergie de mouvement  $E_c$  qui augmente avec sa vitesse.

Dans un mouvement de translation elle est égale au demi-produit de la masse  $m$  par le carré de la vitesse  $v$  :

$$E_c = \frac{1}{2} m \times v^2 \quad (\text{III.4})$$

Avec ;  $v = v_t - v_{t_0}$

**VI.2.2.1. Variation de l'énergie cinétique**

On sait que la dérivée temporelle d'une énergie est une puissance, la puissance mécanique capable de donner une énergie cinétique  $E_c$  à un solide de masse  $m$ , en translation rectiligne, c'est-à-dire la vitesse  $v$ , et à l'accélération  $a$  est :

$$P_t = \frac{dE_c}{dt} = m v \times \frac{dv}{dt} = m a \times v(t) \quad (\text{III.5})$$

Intégrons cette relation :

$$P_t = \frac{dE_c}{dt} \text{ Donc :}$$

$$E_{c_t} - E_{c_0} = \int_0^t P_t \cdot dt = \int_0^t m v \cdot \frac{dv}{dt} = \int_0^t m a \cdot v \cdot dt \quad (\text{III.6})$$

### VI.2.2.2. Conservation de l'énergie cinétique :

L'énergie cinétique acquise par un véhicule (ou un objet quelconque) va diminuer lorsque la vitesse va diminuer, mais cette énergie ne peut pas disparaître elle ne peut que se transformer en une autre énergie.

Lors d'un freinage, l'énergie cinétique se transforme principalement en énergie thermique (chaleur) au niveau des freins.

### VI.2.3. L'énergie mécanique :

L'énergie mécanique d'un corps est l'énergie totale de ce corps, provenant de son mouvement à une vitesse donnée et de sa position dans le champ gravitationnel de la Terre. Donc :

$$E_{m\acute{e}c\acute{a}n\acute{i}q\acute{u}e} = E_{p\acute{o}t\acute{e}n\acute{t}i\acute{e}l\acute{l}e} + E_{c\acute{i}n\acute{e}t\acute{i}q\acute{u}e} \quad (\text{III.7})$$

#### VI.2.3.1. Conservation de l'énergie mécanique

C'est une loi de la nature. Il n'y a pas d'exception connue à cette « loi de conservation de l'énergie ». Il y a une certaine quantité que nous appelons énergie, qui ne change pas dans les multiples modifications que peut subir la nature. L'énergie totale de tout système isolé du reste de l'Univers reste constante, mais l'énergie peut être transformée d'une forme à une autre à l'intérieur du système. Ainsi, le cycliste produit de l'énergie par les mécanismes chimiques de son métabolisme et par la mise en jeu de son appareil locomoteur. Cette énergie libérée se transforme en énergie potentielle et/ou en énergie cinétique qui permettent de lutter contre la force gravitationnelle et les frottements.

D'une façon générale, pour un système fermé, l'énergie se conserve. Il ne peut y avoir que des transformations, et même l'énergie que l'on n'a pas pu utiliser correctement se transforme, au pire, en chaleur. Si ces pertes de chaleur, donc les frottements sont négligeables, et si le système n'échange aucune autre forme d'énergie avec l'extérieur, alors son énergie mécanique est constante.

$$E_{m\acute{e}c\acute{a}n\acute{i}q\acute{u}e} = E_{p\acute{o}t\acute{e}n\acute{t}i\acute{e}l\acute{l}e} + E_{c\acute{i}n\acute{e}t\acute{i}q\acute{u}e} = \text{contante}$$

### VI.3. Mouvement translation rectiligne :

Si un solide est en translation rectiligne, tous les points du solide ont, au même instant, la même vitesse (vectorielle ou algébrique). Ce qui ne signifie pas qu'à un instant suivant, la vitesse, dont la valeur est commune à tous les points, n'aura pas varié. Le mouvement du

solide dépend de sa masse  $m$ . Il est beaucoup plus facile de démarrer ou de freiner un véhicule léger qu'un poids lourd. La masse est appelée « paramètre d'inertie du solide en translation rectiligne ». L'énergie potentielle d'un solide en translation est nulle, donc :

$$E_{m\acute{e}c\grave{a}n\acute{ı}q\grave{u}e} = E_{c\acute{ı}n\acute{e}t\acute{ı}q\grave{u}e}$$

Les unités sont celles du système international :  $v$  en  $m/s$ ,  $m$  en  $kg$  et  $E_c$  en joules

#### VI.4. Translation rectiligne accélérée ou décélérée

Un mouvement est accéléré à un instant  $t$  si l'énergie cinétique augmente à cet instant. Par contre un mouvement est décéléré à un instant  $t$  si l'énergie cinétique diminue à cet instant.

Exprimons la dérivée temporelle de l'énergie cinétique :

$$\frac{dE_c}{dt} = \frac{d\left(\frac{1}{2}mv^2\right)}{dt} = mv \times \frac{dv}{dt} \quad (\text{III.8})$$

Cette expression fait apparaître l'accélération  $\gamma$ , dérivée de la vitesse par rapport au temps, qui est la deuxième variable cinématique du mouvement de translation rectiligne. Si la vitesse est algébrique, l'accélération l'est aussi.

$$\gamma = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x(t)}{dt^2} \quad (\text{III.9})$$

Avec :

$x$  : la distance parcourue ;

Si  $\frac{dE_c}{dt} > 0$  donc  $v \times \gamma > 0$  ;

- Un mouvement est dit « accéléré » si  $v \times \gamma > 0$ . Ce qui recouvre deux cas :  $v > 0$  et  $\gamma > 0$  ou bien  $v < 0$  et  $\gamma < 0$ .
- Un mouvement est dit « décéléré » si  $v \times \gamma < 0$ . Ce qui recouvre deux cas  $v > 0$  et  $\gamma < 0$  ou bien  $v < 0$  et  $\gamma > 0$ .

### VI.5. Phases d'un mouvement :

On décrit le mouvement d'un moyen de transport par son profil de vitesse, ou profil cinématique (Figure III.3). Dans le cas le plus simple ce dernier montre trois phases : le régime transitoire d'accélération, le régime permanent à vitesse constante et le régime transitoire de freinage. Le plus souvent, on peut considérer que le profil de vitesse est constitué de segments de droite. La phase d'accélération est caractérisée par une durée  $t_a$  (temps d'accélération), la phase de freinage par une durée  $t_f$  (temps de freinage). Lorsque les accélérations sont constantes, le profil de vitesse est trapézoïdal. [14]

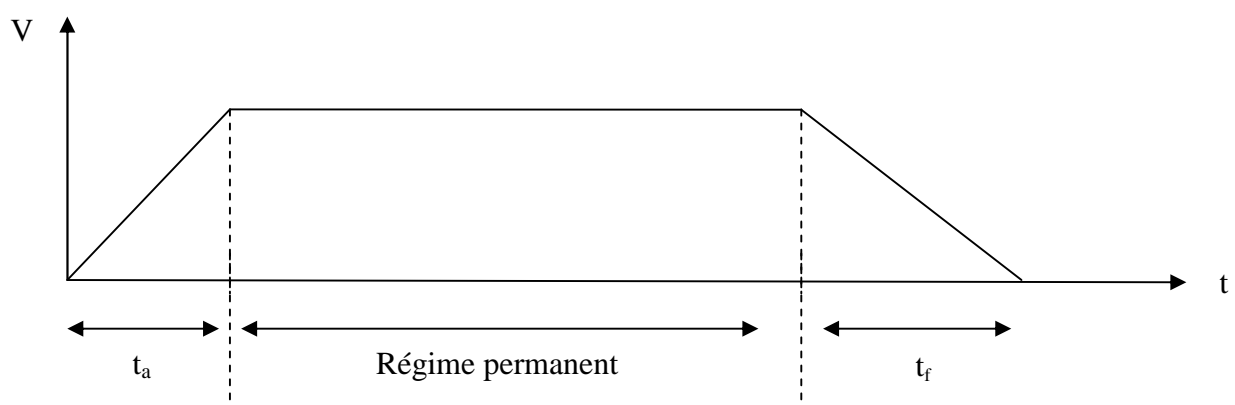


Figure III.3 : profil de vitesse

Phase 1: translation uniformément accélérée (accélération  $> 0$ ) ;

Phase 2: translation uniforme (vitesse constante, accélération nul) ;

Phase 3: translation uniformément décélérée (accélération négative).

### VI.6. Relation de Newton entre force et accélération :

Par combinaison des deux relations (III.2), (III.5) :

$$p t = m \times \gamma t \times v t = F(t) \times v(t) \quad (\text{III.10})$$

Donc :  $F t = m \times \gamma(t)$

En pratique, le solide va être soumis à deux glisseurs, l'un moteur, l'autre résistant, qui sont des signes contraires. Agissant sur le solide de masse  $m$ , ces deux glisseurs engendrent un mouvement de translation rectiligne d'accélération, tel que les résultantes algébriques vérifient la relation de Newton suivante :

$$\sum F = m \times \gamma(t) \quad (\text{III.11})$$

Où :

$m$  : représente le masse (kg)

$\vec{\gamma}$  : représente l'accélération.

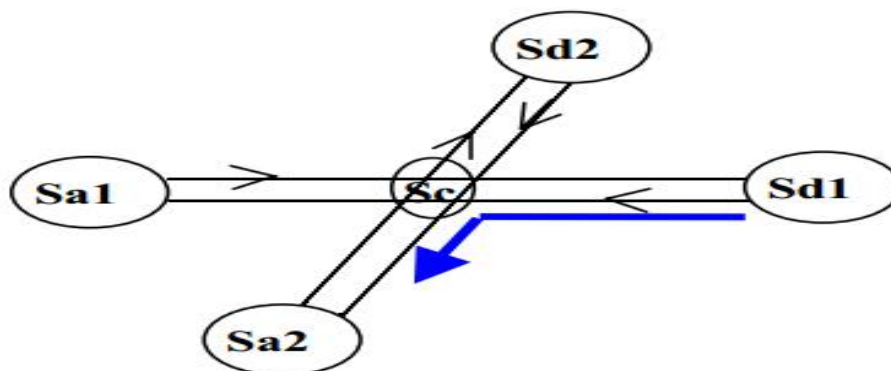
## VII. Modélisation des réseaux de transport :

L'objectif de la modélisation des réseaux de transport est d'obtenir une représentation et une description parfaite afin de pouvoir l'exploiter.

### VII.1. Description du système de transport étudié :

Nous considérons un système de transport constitué de  $n$  lignes de bus (avec  $n \geq 2$ ). Sur chaque ligne, un bus réalise un circuit et passe au même endroit avec une fréquence donnée (fonction du temps de parcours du circuit et de la demande de transport). Les bus de deux lignes différentes fonctionnent de manières indépendantes. Les lignes comportent des arrêts communs que nous appelons stations de correspondance. Ces arrêts permettent aux passagers de changer de ligne en fonction de leur destination.

Dans la suite, nous considérons un système simplifié constitué de deux lignes de bus ( $L_i, L_{i+1}$ ) (Figure). Sur chacune d'elle, un seul bus est initialement en circulation. Nous considérons les passagers descendant d'un bus de la ligne 1 venant de  $Sd1$ , et souhaitant prendre un bus de la ligne 2 vers la station  $Sa2$ .



FigureIII.4:

réseau de transport avec deux lignes de bus

Chaque station  $L_i$  est représentée par sa station de départ  $Sd_i$ , une station de correspondance notée  $Sc$  et une station d'arrivée notée  $Sa_i$ .

**VII.2. Objectif :**

Modéliser et analyser un réseau de transport en commun (bus). Afin de chercher les profils d'accélération, les dates d'exécution qui permettent de minimiser au mieux l'énergie consommée.

Notre approche est basée sur un problème d'optimisation qui consiste en la minimisation d'une fonction objective qui est la consommation d'énergie d'un moyen de transport

La modélisation est faite par les réseaux de Petri (RdP) et en particulier la classe des graphes d'événementstemporisés, puis on a résolu le problème d'optimisation sous Matlab en utilisant les algorithmes génétiques, afin de minimiser la fonction objectif d'une manière à satisfaire toute les contraintes.

**VII.3. Formulation du problème :**

La consommation d'énergie totale dans les véhicules est donnée par l'équation qui suit:

$$E_{mecanique} = E_{cinétique} \quad (III.11)$$

A partir d'équation (III.8) et (III.10) en déduit que la puissance s'exprime par :

$$P(t) = m\vec{x} \cdot \vec{V} = m\vec{V} \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} \quad (III.12)$$

On a :

$$E_{total} = \int_0^t P(t)dt = m \int_0^t V \frac{dV}{dt} = \frac{1}{2} mV^2(t) - \frac{1}{2} mV^2(0) \quad (III.13)$$

$$\frac{dV}{dt} = x \Leftrightarrow V(t) = xt + V(t_0) - xt_0$$

$$V(t) = x(t - t_0) + V(t_0) \quad (III.14)$$

En remplaçant dans l'expression de l'énergie, on obtient :

$$E_{total} = \frac{1}{2} m [x(t - t_0) + V(t_0)]^2 - \frac{1}{2} mV^2(t_0) \quad (III.15)$$

Ainsi l'énergie s'exprime par :

$$E_{total} = \frac{1}{2}m(x^2 \ddagger^2 + 2x\ddagger V(t_0)) \quad (\text{III.16})$$

Avec :

$$\ddagger = t - t_0$$

On considère un bus sur un parcours plat et droit entre deux stations, le bus passe par 3 modes de vitesse :

- accélération  $\gamma > 0$
- vitesse constante  $\gamma = 0$
- décélération  $\gamma < 0$

La figure (III.5) représente l'évolution de la vitesse du bus entre les deux arrêts :

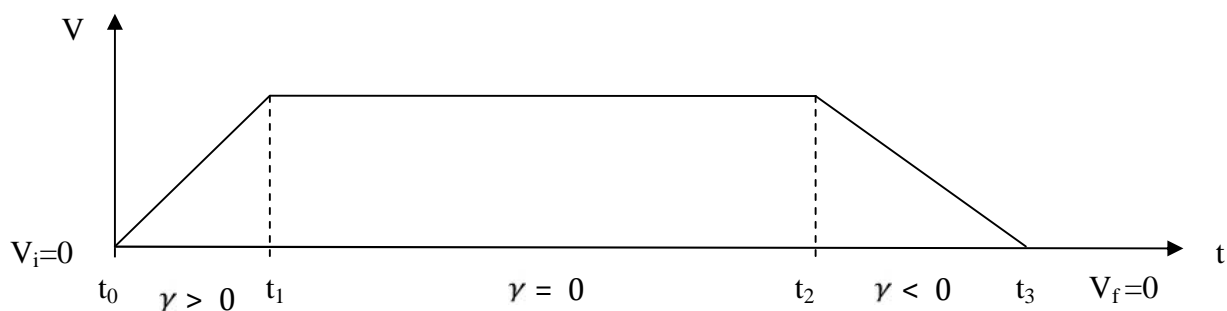


Figure III. 5 : évolution de la vitesse en fonction du temps.

**Équation de la phase 1 : accélération  $> 0$**

$$\gamma_1(t) = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_{t_1} - v_{t_0}}{t_1 - t_0} \quad (\text{III.17})$$

$$v(t)_1 = \gamma_1(t) \times t$$

**Équation de la phase 2 : accélération = 0**

$$\gamma_2(t) = 0 \quad (\text{III.18})$$

$$v_2 t = \text{constante}$$

**Équation de la phase 3 : accélération  $< 0$**

$$\gamma_3 t = \frac{-v_3}{t_3 - t_4} \quad (\text{III.19})$$

#### VII.4. Modélisation de système de transport par réseaux de Petri :

##### VII.4.1.1<sup>er</sup> application (une seule ligne) :

On considère un bus  $B_1$  qui se déplace sur une route plate et droite entre deux stations, donc l'évolution de sa vitesse montre trois phases (accélération, vitesse constante et décélération).

##### VII.4.1.1. Modélisation :

Pour les modéliser, nous utilisons en l'adaptant, une sous classe de l'outil réseaux de Petri: Les graphes d'événements temporisés (GET). Le but est d'élaborer un modèle linéaire déduit de ces GET

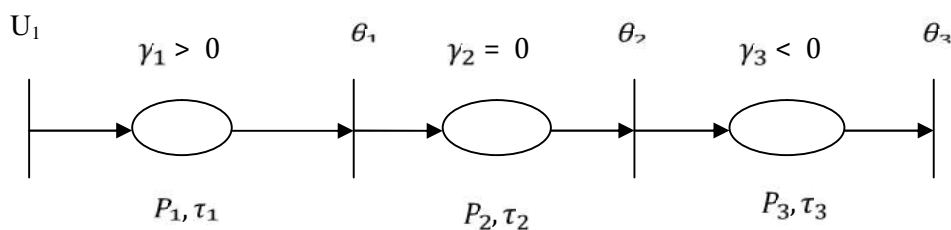


Figure III.6 : Graphe d'événement temporisé (GET)

Nous définissons alors les éléments suivants du modèle RdP :

- Les transitions sont assimilées à la fin de chaque phase (changement de vitesse)
- Les places représentent le trajet du bus
- Les temporisations associées aux places représentent les temps de déplacement du bus dans chaque phase

##### VII.4.1.2. Les équations d'état :

On peut décrire le comportement dynamique d'un graphe d'événement temporisé par des équations d'état. Pour représenter le comportement dynamique du graphe de la figure(III.6) nous associons à chaque transition  $T_i$ , avec  $i=1$  à  $3$ , une fonction dateur  $\theta_i k$ , qui

représente la date de  $k^{\text{ème}}$  franchissement de la transition  $T_i$ . la fonction dateur attribuée à la transition d'entrée est notée  $u(k)$ .

Avec :  $u(k)=0$

Les fonctions dateurs vérifient alors les équations suivantes :

$$\theta_1(k) = \tau_1 + u(k)$$

$$\theta_2(k) = \theta_1(k) + \tau_2$$

$$\theta_3(k) = \theta_2(k) + \tau_3$$

#### VII.4.1.3. Fonction de consommation énergétique (fonction objectif) :

La fonction de consommation du bus  $B_1$  sur un parcours plat et droit entre deux stations dépend de sa vitesse et son accélération. La figure (III.5), montre trois phases : le régime transitoire d'accélération, le régime permanent à vitesse constante et le régime transitoire de freinage.

Donc :

$$E_{L_1} = E_{\tau_1} + E_{\tau_2} + E_{\tau_3}$$

À partir de l'équation (III.16) :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{\tau_1} = \frac{1}{2} m \gamma_1^2 \tau_1^2 \text{ Avec } v_{t_0} = 0 \\ E_{\tau_2} = 0 \text{ Avec } \gamma_2 = 0 \\ E_{\tau_3} = \frac{1}{2} m \gamma_3^2 \tau_3^2 + m \gamma_3 \tau_3 v_3 \text{ Avec } v_3 = v(t_3 - t_2) \end{array} \right. \quad (\text{III.20})$$

Donc :

$$E_{L_1} = \frac{1}{2} m_1 (\gamma_1^2 \tau_1^2 + \gamma_3^2 \tau_3^2 + 2 m_1 \gamma_3 \tau_3 v_3) \quad (\text{III.21})$$

Avec :

$m_1$  : représente la masse du bus  $B_1$  (kg)

VII.4.2.2<sup>ème</sup> application : (deux lignes) :

Constitué de deux lignes de bus qui fonctionnent de manières indépendante et comportent un arrêt en commun.

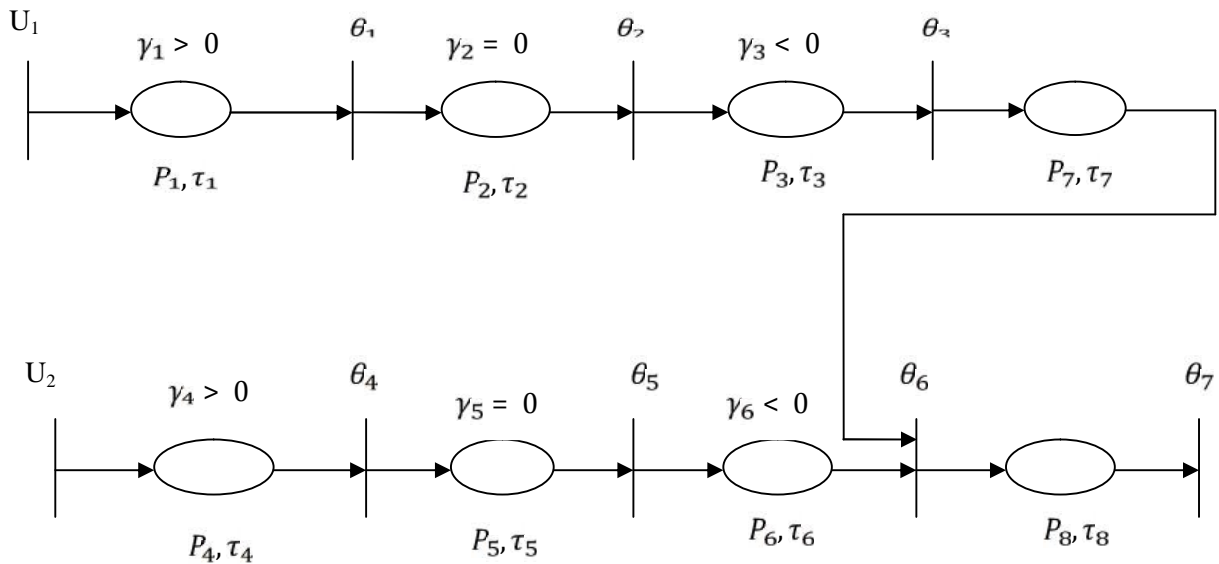


Figure III.7: le modèle de réseau de Petri des deux lignes

Les circuits  $( U_1, P_1, \theta_1, P_2, \theta_2, P_3, \theta_3 )$  et  $( U_2, P_4, \theta_4, P_5, \theta_5, P_6, \theta_6 )$  représentent respectivement les lignes L<sub>1</sub> et L<sub>2</sub>. U<sub>1</sub> et U<sub>2</sub> modélisent les stations de départ des deux lignes.  $\theta_3$  et  $\theta_6$  Représentent la même station de correspondance (Sc) commune aux deux lignes. La place P<sub>7</sub> modélise l'attente des passagers en Sc venant d'un bus B1 et prenant un bus B2.

VII.4.2.1 Les équations d'état :

On peut décrire le comportement dynamique d'un graphe d'événement temporisé par des équations d'état. Pour représenter le comportement dynamique du graphe de la figure(III.7) nous associons à chaque transition  $T_i$ , avec  $i=1$  à 6, une fonction dateur  $\theta_i k$ , qui représente la date de  $k^{ème}$  franchissement de la transition  $T_i$  et des temporisations  $\tau_i$  aux places. La fonction dateur attribuée à la transition d'entrée des bus B1 et B2. son notée  $u_1(k)$  et  $u_2(k)$

Avec  $u_1(k)=0$  et  $u_2 k = 0$

Les fonctions dateuses vérifient alors les équations suivantes :

$$\theta_1(k) = \tau_1$$

$$\theta_2(k) = \theta_1(k) + \tau_2$$

$$\theta_3(k) = \theta_2(k) + \tau_3$$

$$\theta_4(k) = \tau_5$$

$$\theta_5(k) = \theta_4(k) + \tau_5$$

$$\theta_6(k) = \max \{ \theta_3(k) + \tau_7, \theta_5(k) + \tau_6 \}$$

#### VII.4.2.2. Fonction de consommation énergétique (fonction objectif) :

$$E_{total} = E_{L1} + E_{L2}$$

Avec :

$$E_{L1} = E_{t1} + E_{t2} + E_{t3} \text{ (1}^{er} \text{ application)}$$

et

$$E_{L2} = E_{t4} + E_{t5} + E_{t6}$$

D'après l'équation d'énergie (III.16) on a :

$$\left\{ \begin{array}{ll} E_{t4} = \frac{1}{2} m_2 X_{t4}^2 & \text{Avec } v(t_0) = 0 \\ E_{t5} = 0 & \text{puisque } \gamma_0 = 0 \\ E_{t6} = \frac{1}{2} m_2 X_{t6}^2 + m_2 X_{t6} v_4 & \text{Avec } v_4 = v(t_7 - t_6) \end{array} \right. \quad \text{(III.22)}$$

Donc :

$$E_{L2} = \frac{1}{2} m_2 (X_{t4}^2 + X_{t6}^2 + 2X_{t6} v_4) \quad \text{(III.23)}$$

Tel que :

$m_2$  : la masse de B2 (kg)

Donc la fonction d'énergie total de ce système est donnée par :

$$E_{total} = \frac{1}{2} \left[ m_1 (X_{t1}^2 + X_{t3}^2 + 2X_{t3} v_3) + m_2 (X_{t4}^2 + X_{t6}^2 + 2X_{t6} v_4) \right] \quad \text{(III.24)}$$

On cherche des profils de vitesse et d'accélération qui permettent de minimiser cette énergie.

On obtient donc, un problème d'optimisation qu'on résout avec les algorithmes génétiques.

$$\min_{\ddagger_1 \rightarrow \ddagger_n} \left\{ E_{total} = \frac{1}{2} \left[ m_1 \left( x_1^2 \ddagger_1^2 + x_3^2 \ddagger_3^2 + 2x_3 \ddagger_3 v_3 \right) + m_2 \left( x_4^2 \ddagger_4^2 + x_6^2 \ddagger_6^2 + 2x_6 \ddagger_6 v_4 \right) \right] \right\}$$

Sujet à :

$$U_1 = U_2 = 0$$

$$u_1(k) = \ddagger_1$$

$$u_2(k) = u_1(k) + \ddagger_2$$

$$u_3(k) = u_2(k) + \ddagger_3$$

$$u_4(k) = \ddagger_5$$

$$u_5(k) = u_4(k) + \ddagger_5$$

$$u_6(k) = \max \{ u_3(k) + \ddagger_7, u_5(k) + \ddagger_6 \}$$

$$v_3 = x_1 \ddagger_1$$

$$v_3 = -x_3 \ddagger_3$$

$$v_4 = x_4 \ddagger_4$$

$$v_4 = -x_6 \ddagger_6$$

$$a_i \leq u_i \leq d_i$$

$$\ddagger_{\min} \leq \ddagger_i \leq \ddagger_{\max}$$

$$0 \leq x_1 \leq x_{\max}$$

$$x_{\min} \leq x_3 \leq 0$$

(III.25)

Le vecteur  $X$  qu'on cherche :

$$X = \begin{pmatrix} " 1 \\ " 2 \\ " 3 \\ ‡ 1 \\ ‡ 2 \\ ‡ 3 \\ X 1 \\ - X 3 \\ " 4 \\ " 5 \\ " 6 \\ ‡ 4 \\ ‡ 5 \\ ‡ 6 \\ ‡ 7 \\ X 4 \\ - X 6 \end{pmatrix}$$

### VIII.Programmation sous Matlab :

On pose  $a_i$  et  $d_i$  d'une manière à satisfaire toutes les contraintes.

Les dates d'arrivée : Les échéances (deadlines) :

$$a = \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 5 \\ 15 \\ 20 \\ 25 \end{pmatrix} \quad d = \begin{pmatrix} 10 \\ 20 \\ 35 \\ 40 \\ 45 \\ 50 \end{pmatrix}$$

Pour un bon fonctionnement, on a choisi les valeurs suivantes pour les différents paramètres :

$m_1=200$  kg ,  $m_2=250$  kg ,

**VIII.1. Résultats de simulation :**

Après avoir simulé le programme sur Matlab, nous avons obtenu les résultats suivant pour les deux tâches:

**Tâche 1 : (bus B<sub>1</sub>)**

Vitesse((m/s)	$\theta_1$	$\tau_1$	$\gamma_1$	$\theta_2$	$\tau_2$	$\theta_3$	$\tau_3$	$\gamma_3$
<b>100</b>	5.2554	5.2554	19.0280	19.9190	14.6636	34.9996	15.0806	-6.6310
<b>150</b>	7.5001	7.5001	19.9997	19.9993	12.4992	35.0000	15.0007	-9.9995

Tableau III.1 : La variation d'accélération et le temps de traitement en fonction de la vitesse pour la tâche 1

**Tâche 2 : (bus B<sub>2</sub>)**

Vitesse((m/s)	$\theta_4$	$\tau_4$	$\gamma_4$	$\theta_5$	$\tau_5$	$\theta_6$	$\tau_6$	$\tau_7$	$\gamma_6$
<b>100</b>	34.7760	34.7760	2.8755	35.7760	1.0001	50.0000	14.2240	62.2051	-7.0304
<b>150</b>	25.2613	25.2613	5.9380	37.1630	11.9018	50.0000	12.8370	58.1707	- 11.6849

Tableau III.2 : la variation d'accélération et le temps de traitement en fonction de la vitesse pour la tâche 2.

Le Tableau (III.3) illustre l'évolution de l'énergie consommée en fonction de la vitesse des deux tâches (bus).

La vitesse des deux tâches(m/s)	Energie consommée (joule)
100	6.6831
150	9.3494

Tableau III.3 : l'évolution de l'énergie consommée en fonction de la vitesse

**VIII.2. Interprétation des résultats :**

Pour interpréter les résultats de simulation, on doit d'abord vérifier le respect des contraintes pour les 2 tâches.

On vérifie les contraintes pour la tâche 1

$$\theta_1 - \tau_1 = 0 \quad 5.2554 - 5.2554 = 0 \text{ (Vérifiée)}$$

$$\theta_1 + \tau_2 - \theta_2 = 0 \quad 5.2554 + 14.6636 - 19.9190 = 0 \text{ (Vérifiée)}$$

$$\theta_2 + \tau_3 - \theta_3 = 0 \quad 19.9190 + 15.0806 - 34.9996 = 0 \text{ (Vérifiée)}$$

$$\gamma_1 \times \tau_1 - V_3 = 0 \quad 19.0280 \times 5.2554 - 100 = 0 \text{ (Vérifiée)}$$

$$\gamma_3 \times \tau_3 + V_3 = 0 \quad -6.6310 \times 15.0806 + 100 = 0 \text{ (Vérifiée)}$$

On fait la même chose pour la tâche 2.

Après vérification de toutes les contraintes pour les deux tâches, on déduit que les résultats de simulation respectent les contraintes posées.

A partir des tableaux (1) (2) (3) on conclut les résultats suivants :

- En diminuant la vitesse, l'accélération diminue et la consommation d'énergie diminue
- Accélération et décélération engendre une augmentation de la consommation d'énergie
- Un parcours avec beaucoup d'arrêts et de démarrages est plus consommateur d'énergie

**IX. Conclusion :**

Réduire la consommation d'un système de transport s'avère une rude tâche et un vrai défi pour tous les acteurs concernés.

Nous avons présenté les différentes sources de consommation énergétique d'un moyen de transport, qui dépend de plusieurs facteurs, à cet effet, nous avons proposé quelques solutions pour faire des économies d'énergie dans les transports.

Dans ce chapitre, nous avons cherché des profils de vitesse et d'accélération, qui permettent de minimiser cette énergie. Pour ce faire, nous avons utilisé la modélisation par un graphe d'événements temporisé sous contrainte temporelles, qui permet de modéliser le comportement d'un réseau de transport. Par conséquent, nous avons rencontré un problème d'optimisation que nous avons résolu par la suite avec les algorithmes génétiques.

Après simulation, nous avons déduit que lorsque nous diminuons la vitesse, l'accélération diminue et la consommation d'énergie avec. En revanche, un parcours avec beaucoup d'arrêts et de démarrages consomme plus d'énergie.



# Conclusion générale

Il paraît clair que le développement des transports a une part de responsabilité dans le réchauffement climatique. Réduire la consommation et les émissions de ce secteur s'annonce comme une tâche difficile et un vrai défi pour tous les acteurs concernés. Cependant des mesures récentes ont montré que pour un même moyen de transport, avec le même horaire, sur la même voie, il peut y avoir une énorme variation dans la consommation d'énergie selon la conduite adoptée.

L'objectif de ce mémoire était d'étudier la conduite d'un système de transport en temps réel en minimisant son énergie. Pour réaliser cet objectif nous devons tout d'abord disposer d'un outil de modélisation permettant de minimiser la consommation énergétique d'un processeur ensuite nous devons modéliser et analyser un réseau de transport en commun (bus), afin de chercher les profils d'accélération, les dates d'exécution qui permettent de minimiser au mieux l'énergie.

Ce travail nous a permis, en première partie, de mieux comprendre les systèmes temps réels, les notions de tâches, leurs natures et caractéristiques, et les problèmes d'ordonnancement. Des algorithmes permettant de donner des solutions d'ordonnancement temps réel sont présentées, et aussi nous avons présenté quelques généralités sur les systèmes de transport et les réseaux de Pétri (quelques définitions et propriétés).

La deuxième partie de ce travail nous a permis de traiter le problème de minimisation de la consommation énergétique d'un processeur dans un système temps réel. Diverses techniques d'optimisation sont abordées, leurs utilisations permettent d'obtenir une diminution importante de la consommation énergétique due aux traitements effectués. Nous avons utilisé l'algorithme génétique pour ordonnancer en hors-ligne un problème temps réel à 3 tâches, nous avons considéré les tâches de traitement du système non préemptives et aperiodiques. Cette méthode nous a permis de conclure qu'en diminuant la tension, le temps de traitement augmente et la consommation d'énergie diminue.

La troisième partie de ce travail nous a permis de trouver des profils d'accélération, les dates d'exécution pour un système de transport en commun (bus) qui permettent de minimiser au mieux l'énergie. Nous avons modélisé et analysé le système, en utilisant les réseaux de Petri (RdP) et en particulier la classe des graphes d'événements temporisés, puis on a résolu le problème d'optimisation sous Matlab en utilisant l'algorithme génétique.

## Conclusion générale

---

Après simulation, nous avons déduit que lorsque nous minimisant la vitesse d'un moyen de transport, l'accélération diminue et la consommation d'énergie

# **Bibliographie**

## Bibliographie

---

- [01] A. Burns et A. Wellings. « Real Time Systems and Programming Languages ».Wesley Educational Publishers Inc , USA .2001
- [02] A. Bertout. « Minimisation du nombre de tâches d'un système temps réel par regroupement». Université de Lille1. 2015
- [03] A.Benfekir. « Contribution à l'analyse de performances des Systèmes à Evénements Discrets non linéaires dans l'algèbre (min,+) ».décembre 2013.
- [04] ADEME. « Consommation conventionnelle de carburant et émissions de gaz carbonique des véhicules particuliers en France ». 2009.
- [05] A. Rahni « Contributions à la validation d'ordonnancement temps réel en présence de transactions sous priorités fixes et EDF ». Université de Poitiers, 2008.
- [06] Ahmed Nait-Sidi-Moh. « Contribution à la modélisation, l'analyse et la commande des systèmes à événements discrets par les réseaux de Petri et l'algèbre (max, plus) : Application aux systèmes de transport. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2003.
- [07] Ch.Garnier .« les systèmes temps réel et l'industrie ». Laboratoire Temps Réel à l'ISEP,page 39
- [08] C. Kaiser. « Applications Concurrentes :Conception, Outils de Validation ». octobre 2001
- [09] C.G. Cassandras , S. Lafortune « Introduction to Discrete Event Systems, Kluwer Academic Publishersé », 1999.
- [10] D.Christophe .« Les Systèmes Temps Réels ». Université de Strasbourg. 2010
- [11] D. Ríos Arámbula « Systemes a microprocesseurs asynchrones basse consommation ». Thèse de doctorat. Septembre 2008.
- [12] F. Parain, M. Banâtre, G. Cabillic, T. Higuera, V. Issarny « Techniques de réduction de la consommation dans les systèmes embarqués temps-réel. » . [Rapport de recherche] RR-3932, INRIA. 2000.
- [13] G. Cormier. « algorithme génétique », [www8.umoncton.ca/umcm-cormier\\_gabriel/SystemesIntelligents/AG.pdf](http://www8.umoncton.ca/umcm-cormier_gabriel/SystemesIntelligents/AG.pdf).
- [14] G. Daniel «Electrotechnique 1 : Physique appliquée à la conversion et à la distribution de l'énergie électrique». p42
- [15] G. Daniel « ÉLECTROTECHNIQUE Cours complet illustré de 96 exercices résolus Physique appliquée à la conversion et à la distribution de l'énergie électrique ».édition EYROLLES
- [16] H. Harrouche. « synthèse de superviseur basée sur les réseaux de Petri ». Mémoire de magister. Université Mouloud Mammeri.2012

## Bibliographie

---

- [17] H. Laurent « Contribution à la commande des systèmes (max; +)-linéaires. Applications aux réseaux de transport. » Thèse de doctorat. l'ISTIA - Université d'Angers. décembre 2006.
- [18] H.Jo. « L'énergie sous toutes ses formes I : Comment se transforme t-elle? ».EDP sciences . 2014.
- [19] Hong Tu Luu. « Développement de méthodes de réduction de la consommation en carburant d'un véhicule dans un contexte de sécurité et de confort : un compromis entre économie et écologie ».
- [20] I.Iulian Ober . « Introduction aux systèmes temps réel » . Cours M2 NTIE.
- [21] I. PUAUT, R. COZOT « Programmation temps-réel Cours 1 et 2. Introduction et ordonnancement ». Université de Rennes I.
- [22] J. Carlier et Ph. Chrétienne « Problèmes d'ordonnancement : modélisation, complexité, algorithmes ». Paris. 1988.
- [23] Joseph Y-T. Leung. «Handbook of Scheduling: Algorithms, Models, and Performance Analysis». Chapman & Hall/CRC Computer & Information Science Series, 2004.
- [24] LASTI - Groupe Signal Architecture « Réduction de consommation d'énergie en électronique embarquée ». Université de Rennes.
- [25] L. Bougueroua « conception de système temps réel déterministes en environnement incertain » thèse de doctorat. Mars 2007.
- [26] M. MAROUF. « Ordonnancement temps réel dur multiprocesseur tolérant aux fautes appliqué à la robotique mobile ».thèse de doctorat de l'école nationale supérieure des mines de Paris. juin 2012.
- [27] M.Didi-Alaoui. « Étude et supervision des graphes d'événements temporisés et temporels : vivacité, estimation et commande ». Thèse de doctorat. Université d'Angers, Décembre 2005.
- [28] M.Weiser, B.Welch, A. J. Demers, and S. Shenker. « Scheduling for reduced CPU energy. In Operating Systems Design and Implementation pages». 13–23, 1994.
- [29] P. Beuzit. « Hydrogène : L'avenir de la voiture ». |L'Archipel.2007 p15
- [30] P. Guitton. « Estimation et optimisation de la consommation lors de la conception globale des systèmes autonomes ». Thèse de doctorat de l'université de Nice Sophia-Antipolis. 2004.
- [31] P. Guitton. « Estimation et Optimisation de la Consommation lors de la conception globale des systèmes autonomes. ». Université Nice Sophia Antipolis, 2004.
- [32] «Power Reconfigurable DSP Architecture », IPPS/SPDP Workshops, p. 55–60, 1998.
- [33] R. David, H. Alla. « Du grafctet aux réseaux de Petri ».2<sup>e</sup> édition revue et augmenté avril 1997.

- [34] R. DAVID, O. SENTIEYS. « Architectures reconfigurable: opportunités pour la faible consommation ». p 31-40, mai 2003.
- [35] S. Bouzefrane. Maître de Conférences « Cours Ordonnancement centralisé de tâches temps réel ». CEDRIC –CNAM
- [36] S. Collart-Dutilleul. « Réseaux de Petri P-temporels: Modélisation et validation d'exigences temporelles ». Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, 2008.
- [37] T. Hammouni, O. Boudehane. « modélisation et commande d'un système de transport sous contraintes temporelles dans l'algèbre Max-Plus ». Mémoire de fin d'études. Université Mouloud Mammeri, 2016.
- [38] T. Sami. « Vers une mémoire transactionnelle temps réel ». Université de Nantes. 2012.
- [39] V. TIWARI, S. MALIK, A. WOLFE. « Power Analysis of Embedded Software : a First Step towards Software Power Minimization ». 1994.
- [40] DAI. « fiches URE industrie –transport- ». 2013

## **Le résumé**

L'objectif de ce mémoire était d'étudier la conduite d'un système de transport en temps réel en minimisant son énergie. Pour réaliser cet objectif nous devons Modéliser et analyser un réseau de transport en commun (bus), afin de chercher les profils d'accélération, les dates d'exécution qui permettent de minimiser au mieux l'énergie.

Ce travail nous a permis, en première partie, de mieux comprendre les systèmes temps réels, et aussi nous avons présenté quelques généralités sur les systèmes de transport et les réseaux de Pétri (quelques définitions et propriétés).

Dans la deuxième partie de ce travail nous avons traité le problème de minimisation de la consommation énergétique d'un processeur dans un système temps réel.

La troisième partie de ce travail nous a permis de trouver des profils d'accélération, les dates d'exécution pour un système de transport en commun (bus) qui permettent de minimiser au mieux l'énergie. Nous avons modélisé et analysé le système, en utilisant les réseaux de Petri (RdP), puis on a résolu le problème d'optimisation sous Matlab.

### **Mots clés :**

Systèmes à événements discrets, système de transport, minimiser l'énergie, réseaux de Petri, système temps réel, microprocesseur.