

## Avant-propos

Il existe de nombreux ouvrages sur la logistique, la recherche opérationnelle, l'aide à la décision, la théorie des graphes, la programmation dynamique... mais peu d'entre eux rassemblent tous ces domaines en proposant une vision synthétique par laquelle on s'affranchit, sans les négliger, des aspects mathématiques purs et durs tout en offrant de nombreux exercices pratiques.

Le livre que vous tenez entre vos mains est constitué de 3 volumes. Le premier aborde les aspects théoriques avec pour chaque chapitre des exercices corrigés et se termine par une présentation des principaux logiciels dédiés à la RO et la simulation logistique. Le second et le troisième sont réservés à la pratique et aux applications logicielles spécialisées.

La plupart des travaux proposés ici sont réalisables à l'aide d'une simple calculatrice, d'une feuille et d'un stylo ou bien avec l'aide d'un tableur de type Microsoft Excel, Apache OpenCalc, Apple Numbers, etc.

Les techniques présentées et leurs domaines d'utilisation sont multiples mais je suis sûr qu'un étudiant, un logisticien, un développeur, un technicien, un ingénieur, un informaticien, un décideur... et vous-même, lecteur, leur trouveront des applications pratiques insoupçonnées dans votre vie professionnelle, voire même personnelle.

### **Public visé**

Cet ouvrage est destiné à tous ceux qui rencontrent des problèmes logistiques liés à la gestion des flux, l'aide à la décision, l'optimisation de trajets ou de tournées, la recherche d'un objectif face à de multiples contraintes, la création de tableaux de bord et de simulations pertinentes, etc.

Les travaux présentés requièrent un minimum de connaissances mathématiques ; un étudiant de niveau bac+2, scientifique ou économique, ne devrait pas rencontrer de difficultés majeures. J'ai essayé de rester simple et d'aller droit au but dans l'approche théorique sans m'embarrasser de grandes démonstrations qui ne me paraissaient pas nécessaires.

En ce qui concerne les exercices pratiques, sur micro-ordinateur, abordés dans les volumes 2 et 3, une bonne connaissance du système d'exploitation (chemin, dossier et répertoires, fichiers, noms, extensions, copie, déplacement, etc.) sera essentielle.

Certains travaux utilisent un tableur, il vous faudra donc maîtriser les fonctionnalités de base de ce type de logiciel. Il sera aussi bienvenu de connaître l'usage primaire d'outils de manipulation de données de type TCD (tableaux croisés dynamiques).

Si vous êtes un adepte du langage VBA (*Visual Basic Application*) ou d'un de ses équivalents, vous pourrez pleinement comprendre, améliorer, enrichir et créer de nouvelles solutions pour certains problèmes.

Enfin, si vous possédez quelques prémisses sur les systèmes de gestion de base de données et l'algèbre relationnelle, alors vous serez pleinement à l'aise dans tous les domaines abordés.

## Organisation et contenus du livre

Cet ouvrage est composé de trois volumes :

- 1) *Théorie et fondamentaux* ;
- 2) *Tableaux de bord, planification et gestion de trafic* ;
- 3) *Flux discrets et continus en 2D/3D*.

Le volume 1 présente successivement une introduction suivie par 10 chapitres et une conclusion :

- approche de la logistique ;
- une vue d'ensemble de la recherche opérationnelle ;
- les bases de la théorie des graphes ;
- le calcul des chemins optimaux ;
- la programmation dynamique ;
- la planification et l'ordonnancement avec PERT et MPM ;

- les calculs de flots dans un réseau ;
- les arbres couvrants et les tournées ;
- la programmation linéaire ;
- modélisation du trafic routier ;
- divers logiciels pour la RO et la simulation des flux logistiques.

C'est ici que vous trouverez les concepts fondamentaux nécessaires à la compréhension du second volume. De nombreux exemples accompagnent la théorie et chaque chapitre se termine par une série d'exercices avec leurs solutions.

La conclusion, comme son nom l'indique, essaie d'établir un bilan sur l'état actuel de la logistique théorique et son développement futur.

Les annexes 1 et 2 apportent quelques éléments supplémentaires. Vous y trouverez dans cet ordre :

- la table de la loi normale centrée réduite ;
- une présentation et un mini-manuel consacré au logiciel de calcul GeoGebra.

Le volume 2 débute par une introduction complétée par 4 chapitres mettant en œuvre des outils logiciels sur des cas d'applications pratiques pour se terminer par une conclusion :

- les différents outils utilisés dans ce volume ;
- la recherche opérationnelle avec un tableur ;
- les tableaux de bord avec un tableur et les tableaux croisés dynamiques ;
- l'ordonnancement et la planification avec un gestionnaire de projets ;
- la simulation de trafic routier.

La conclusion présente les nouvelles fonctionnalités qui devraient voir le jour sur les tableurs et les gestionnaires de projet ainsi que les évolutions et les convergences entre les simulateurs de trafic et les nouvelles infrastructures qui voient le jour sur les réseaux routiers.

L'annexe 1 est consacrée à l'installation du solveur au sein de Microsoft Excel.

L'annexe 2 est dédiée à l'installation du kit de développement Java.

Le volume 3 commence par une introduction à laquelle viennent s'ajouter 4 chapitres dédiés à la modélisation et la simulation de flux dans un environnement en 2 ou 3 dimensions (2D ou 3D). Ils traitent différents cas extraits de situations rencontrées sur le terrain. Une conclusion vient clore ce troisième ouvrage :

- les différents logiciels utilisés dans ce 3<sup>e</sup> volume ;
- la simulation de flux informatisés discrets ;
- la simulation de flux mixtes ;
- les flux en 3D et la simulation d'évacuation ;
- les flux en 3D pour le convoyage et l'entreposage.

La conclusion aborde les évolutions futures des logiciels et leur intégration au sein de la société.

A la fin de chaque volume, vous trouverez une bibliographie et une liste de liens Internet.

Un glossaire est aussi présent, il viendra expliciter certains sigles ou acronymes et certaines terminologies très spécifiques de la logistique et de la recherche opérationnelle.

## Conventions

Cet ouvrage utilise les conventions typographiques suivantes :

– *italique* : il est réservé à des termes importants utilisés pour la première fois dans le texte et que l'on retrouve généralement dans le glossaire en fin d'ouvrage : des termes mathématiques, des commentaires, des équations, des expressions ou des variables présents dans les chapitres théoriques et pratiques au sein des exemples et des exercices ;

– (*italique*) : ce sont des termes en langue anglaise ou étrangère ;

– MAJUSCULE : elles sont réservées à des noms de fenêtres, d'icônes, de boutons, de dossiers ou répertoires, de menus ou de sous-menus. Ce peut être aussi des éléments, des options ou des commandes présents dans la fenêtre d'un programme ;

– courrier : cette police est utilisée pour les lignes de code VBA (*Visual Basic Application*). Ces lignes peuvent se terminer par le symbole `<`, ce qui implique un retour à la ligne obligatoire lors de la saisie.

Les remarques sont signalées par la présence du mot-clé : REMARQUE. Elles viennent compléter les explications déjà fournies.

Les théorèmes sont précédés du mot-clé : THÉORÈME.

Les figures et les tableaux possèdent tous une légende qui est souvent utile à la compréhension.

## **Vocabulaire et définition**

Comme pour toutes les techniques, les outils d'optimisation logistiques possèdent leur propre vocabulaire, des mots, des acronymes, des abréviations, des sigles et des noms propres pas toujours familiers. C'est le rôle du glossaire déjà cité.

## **Remerciements**

Je tiens tout particulièrement à remercier l'équipe de ISTE Editions et mon éditrice Chantal Ménascé qui ont su me faire confiance, Jacqueline Gélinaud de la société 1point2, distributeur des logiciels ExtendSim et Pathfinder, Clair Augsburg de FlexSim France, sans oublier mon très cher ami, Pascal Mauny, directeur de l'IUT de Chalon-en-Saône et maître de conférence à l'Université de Bourgogne, pour le temps, l'attention et l'écoute qu'il a su m'accorder et pour la rédaction de la préface de cet ouvrage.

Enfin, je souhaite remercier mon épouse, Vanna, qui m'a soutenu tout au long de l'écriture de ce livre.



# Introduction

## Logistique, système d'informations et logiciels

Le dernier chapitre du volume 1 de cet ouvrage s'est terminé par une présentation des logiciels utilisés pour résoudre les différents problèmes logistiques auxquels les structures industrielles, commerciales et administratives sont quotidiennement confrontées.

Depuis son apparition, la logistique est omniprésente et a beaucoup évolué. La mondialisation, l'explosion du web et la course permanente pour faire toujours mieux, toujours plus vite, toujours plus performant, pour moins cher, ont largement contribué à son expansion.

Si nous n'en sommes plus aux prémises, peut-on dire que la logistique a atteint sa maturité ? Rien n'est moins sûr, l'Internet des objets, encore naissant aujourd'hui, devrait changer profondément les règles habituelles de gestion des produits dans les années à venir.

La création et l'évolution de nos cités vers des villes intelligentes ou *smart cities* vont bientôt bouleverser notre quotidien et nos habitudes au travail, dans les transports, dans les entreprises et jusque chez nous.

La centralisation des données de tous types et leur convergence vers des fichiers centraux ne font que commencer. Nous sommes et nous serons encore plus présents dans le futur au sein des systèmes d'informations et des bases de données. Mais ce n'est pas seulement nous, en tant qu'individus, mais aussi notre environnement et les objets que nous utilisons qui vont entrer dans ce gigantesque entrepôt de données en train de se construire.

En 1997, la notion de *Big Data* ou méga-données est apparue, c'est pour beaucoup de chercheurs un des défis que devra relever l'industrie de l'information des années 2020-2030 : exploiter et analyser correctement cette accumulation massive de contenus.

L'optimisation et la simulation de flux logistique participent à ce phénomène, elles puisent des données avec lesquelles elles construisent des modèles et bâtissent des architectures pour optimiser des contraintes présentes sur le terrain.

Les logiciels utilisés sont nombreux et se répartissent en deux catégories, les spécifiques qui sont dédiés à des domaines précis comme la *simulation de flux* (ExtendSim, FlexSim, Arena, Witness, etc.), la gestion et la *planification* de projet (Microsoft Project, Sciforma PS, GanttProject, MicroPlanner, etc.), le calcul et l'*optimisation de tournées* (Gazoleen, Portatour, Mapotempo, Geoconcept, TourSolver, etc.), la gestion d'*entrepasage*<sup>1</sup> (Speed, Reflex WMS, Mecalux Easy WMS, etc.) et les applications généralistes, comme les tableurs (Microsoft Excel, Apple Numbers, OpenOffice Calc, etc.) ou les gestionnaires de calculs (Mathematica, Maple, Xcas, GeoGebra, etc.).

Dans les volumes 2 et 3 de cet ouvrage, j'ai voulu vous faire découvrir l'optimisation et la simulation des flux logistiques au travers de quelques-uns de ces logiciels. Ceux que j'ai choisis et privilégiés partagent mon travail au quotidien, aussi bien dans mon activité d'ingénieur consultant IT que dans mes enseignements auprès des étudiants.

La plupart des cas traités sont issus de cas pratiques quelque fois édulcorés afin de ne pas surcharger leur présentation et de faciliter ainsi l'accès au néophyte qui pourra toujours aller plus loin si c'est son choix.

Dans ce second volume, nous travaillerons successivement avec le tableur Microsoft Excel, le gestionnaire de projet Microsoft Project et les simulateurs de trafic routier Ring Road, RoadTrafficSimulator, Intersection Simulator, Green Light District (GLD) et AnyLogic<sup>2</sup>.

Les travaux réalisés avec une feuille de calcul reprendront plusieurs des techniques de recherche opérationnelle décrite dans le volume 1.

---

1. Les logiciels de gestion d'entrepasage sont souvent désignés par l'acronyme WMS (*Warehouse Management System*).

2. Bien qu'AnyLogic soit un logiciel de simulation des flux généraliste, l'exemple que je présenterai dans cet ouvrage sera dédié à la modélisation du trafic routier.

Nous aborderons successivement :

– la *programmation dynamique* avec la résolution du problème dit KP (*Knapsack Problem*). Cet exercice utilisera une solution utilisant VBA (*Visual Basic Application*) avec lequel vous développerez deux procédures détaillées et commentées ;

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1	Capacité	14		n	6																	
2																						
3	Objet	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J											
4	Poids	2	1	5	2	4	3															
5	Valeur	7	8	14	5	10	15															
6																						
7		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
8		0	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
9		0	8	8	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
10		0	8	8	15	15	15	22	22	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
11		0	8	8	15	15	20	22	22	29	29	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
12		0	8	8	15	15	20	22	25	29	30	34	34	35	39	44	44	44	44	44	44	44
13		0	8	8	15	23	23	30	30	35	37	40	44	45	49	49	49	49	49	49	49	49
14																						
15																						
16																						
17																						
18																						
19																						
20	Poids max	13																				
21	N° col. Obj.	6	4	3	2	1																
22	Objets	F	D	C	B	A																
23	Valeur	15	5	14	8	7																
24	Valeur Tot.	49																				

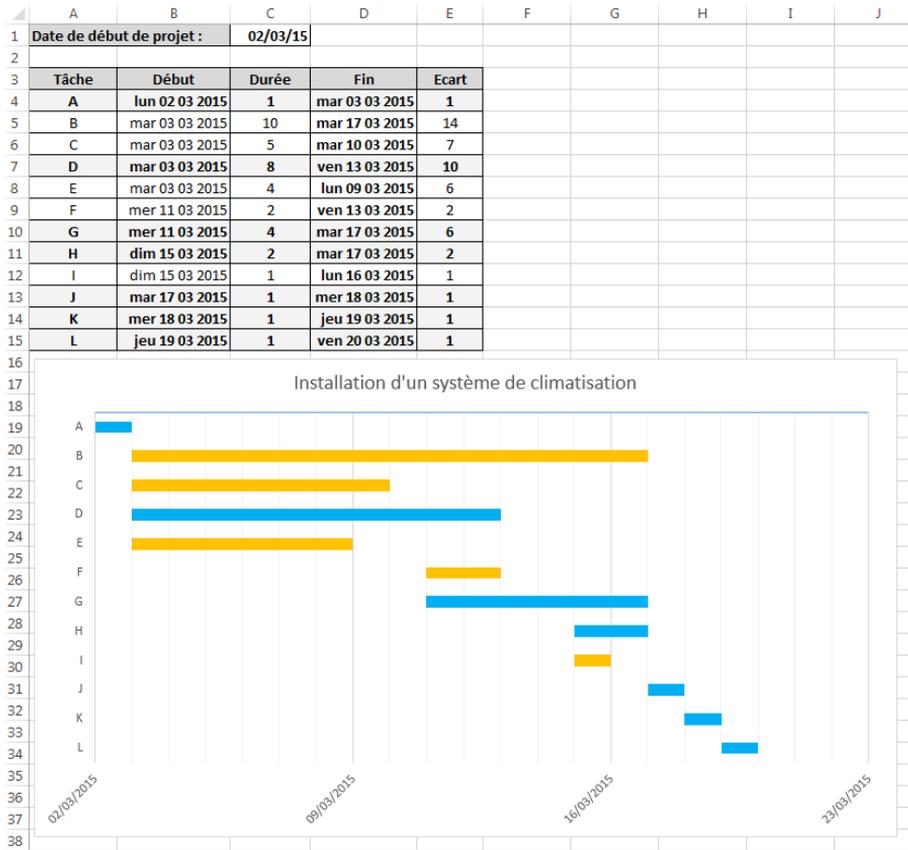
Figure I.1. Knapsack avec Microsoft Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	
1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	i										
2	1		2									0										
3	2			10	6	8						2	2									
4	3					0						12	12									
5	4					4	10	18				8	8	8								
6	5						5					12	12	12	10							
7	6							4				18	18	18								
8	7								4			26	22	17	26							
9	8									4		30	30									
10	9										4	30	30									
11	10											30	30									
12	j	0	2	21	8	21	26	26	30	30	30											
13		0	11		17		22	26														
14			2	21	16	21																
15			13		8		0															
16							30															
17																						
18																						
19																						
20																						
21																						
22																						
23		Chemin critique :										1	2	4	7	8						
24		Durée du projet :										30										

Figure I.2. Une matrice de calcul du chemin critique

– l’ordonnancement où vous concevrez une matrice de détermination du chemin critique reposant sur des formules de calcul simples intégrant pour la plupart d’entre elles des instructions conditionnelles ;

– la planification de tâches vous fera découvrir comment on peut utiliser un histogramme afin de générer un *diagramme de Gantt* associé ou non à un calendrier ;



**Figure I.3.** Diagramme de Gantt avec Microsoft Excel

– la gestion des *flots maximaux* vous conduira à mettre en œuvre, comme pour la programmation dynamique, deux procédures commentées et détaillées en Visual Basic, associées à une feuille de calcul ;

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	De	A	Flot	Capacité		Sommets	Flot net	Offre/demande
2	S	P1	6000	10000		S	14000	
3	S	P2	8000	8000		P2	0	0
4	S	P3	0	6000		P3	0	0
5	P1	P2	0	4000		R1	0	0
6	P1	R1	6000	6000		R2	0	0
7	P2	R1	4000	4000		R3	0	0
8	P2	R2	2000	2000		R4	0	0
9	P2	R3	2000	2000		R5	0	0
10	P3	P2	0	4000		P1	0	0
11	P3	R3	0	6000		T	-14000	
12	R1	R2	4000	4000				
13	R1	R4	6000	6000				
14	R2	R4	4000	4000				
15	R2	R5	2000	3000				
16	R3	R2	0	6000				
17	R3	R5	2000	2000				
18	R4	T	10000	12000				
19	R5	T	4000	4000				
20								
21								
22							10	
23								
24								
25								
26								
27	Nb. Arcs		18					
28	Flot maximum		14000					
29								

Figure I.4. Un exemple de tableau de calcul de flots maximaux

– les *modèles de transport* reposeront sur un outil présent au sein de Microsoft Excel, appelé solveur. Vous apprendrez à l'utiliser en saisissant les différents éléments nécessaires à son exploitation : objectif, variables et contrainte au travers de deux exemples ;

	A	B	C	D	E	F	G	H
1		Coûts de transport						
2		C1	C2	C3	C4	C5	Stock usine (kg)	
3	U1	300,00 €	2 400,00 €	300,00 €	1 500,00 €	1 200,00 €	7 200	
4	U2	1 500,00 €	1 500,00 €	900,00 €	1 800,00 €	2 100,00 €	4 800	
5	U3	600,00 €	900,00 €	1 500,00 €	2 700,00 €	2 400,00 €	7 800	
6	Commande (kg)	3 600						
7								
8		C1	C2					
9	U1	0						
10	U2	0						
11	U3	3 600						
12	Qté à recevoir	3 600						
13								
14	Objectif	1975000						
15								

Paramètres du solveur

Objetif à définir : \$B\$14

À :  Max  Min  Valeur : 0

Cellules variables : \$B\$9:\$F\$11

Contraintes : \$B\$12:\$F\$12 = \$B\$6:\$F\$6  
\$G\$9:\$G\$11 = \$G\$3:\$G\$5

Ajouter Modifier

Figure I.5. Calculs de coûts de transport avec le solveur de Microsoft Excel

– la programmation linéaire demande aussi l'utilisation du solveur pour traiter le *simplexe*. Dans cet exercice vous apprendrez à créer le tableau de calcul qui formalisera les inéquations des contraintes d'un problème de PL ainsi que sa fonction économique, puis le paramétrage du solveur pour qu'il recherche la solution optimale.

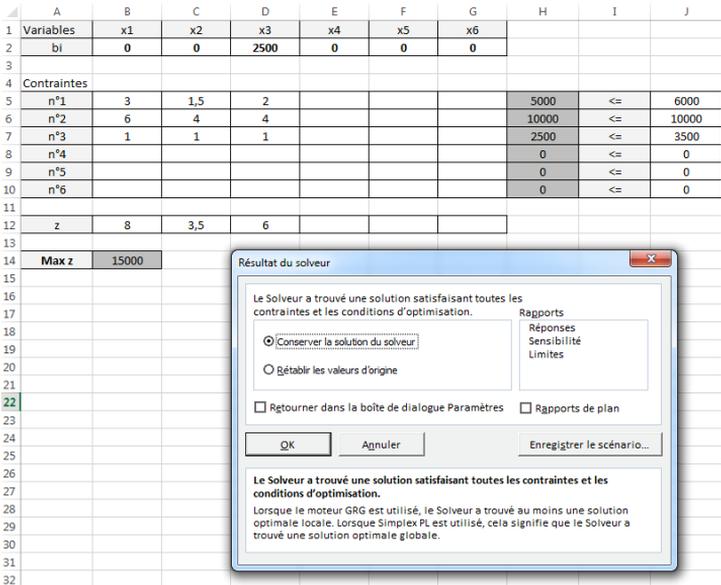


Figure I.6. Un exemple de programmation linéaire, tableau de calculs et solveur

Dans un second temps le tableur nous permettra de créer des *tableaux de bord* mettant en œuvre les *tableaux croisés dynamiques* complexes travaillant sur une ou plusieurs bases de données.

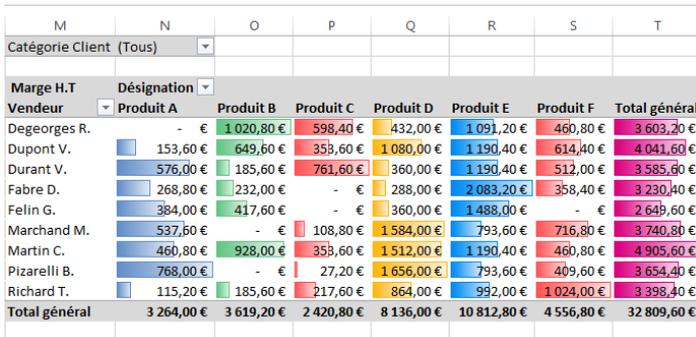
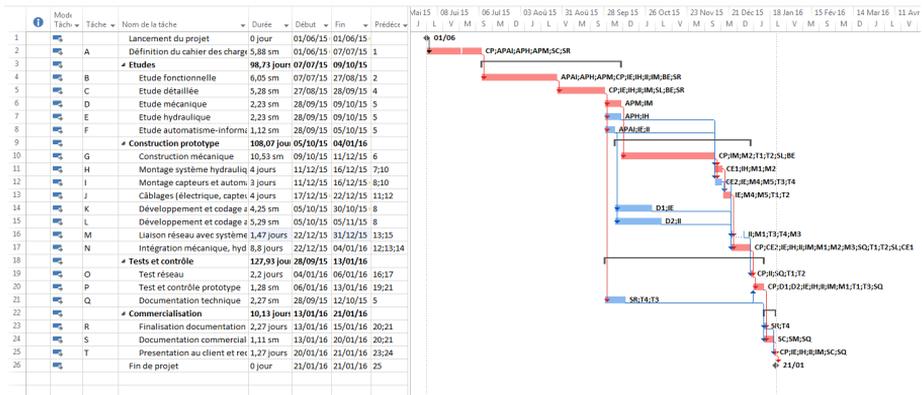


Figure I.7. Un tableau croisé dynamique mélangeant données chiffrées et graphiques

Au sein du gestionnaire de projets, nous mettrons en place un planning de conception et de fabrication d'une machine-outil en intégrant les différentes tâches, les ressources, les coûts, la création de tableaux de bord, de rapports et le suivi. Nous verrons en détail les affichages de type diagramme de Gantt et réseau MPM (méthode des potentiels métra) sans oublier la *codification WBS (Work Breakdown Structure)*, le calcul des marges et la gestion des surutilisations de ressources. L'ensemble de ces travaux reprendra les principes développés dans le chapitre 5, dédié à l'ordonnancement, du premier volume de cet ouvrage.



**Figure I.8.** Le planning de conception-fabrication d'une machine-outil au sein de Microsoft Project

Le chapitre 4 portera sur un domaine spécifique et très complexe, la *gestion du trafic routier*. Nous étudierons plusieurs problèmes liés à la circulation des véhicules dans des situations et des contextes divers, à différentes échelles, tout en utilisant plusieurs logiciels.

Plusieurs exemples seront traités pour chacune des cinq applications étudiées :

- un simulateur de *congestion* ;
- un éditeur-simulateur d'écoulement de trafic dans un modèle incorporant croisements et feux de signalisation ;
- un simulateur d'optimisation d'une *intersection* gérée par des feux de signalisation ;
- un éditeur-simulateur de réseau routier multivoies, intégrant plusieurs types de véhicules, avec gestion de feux de signalisation ;

– un simulateur généraliste multiméthodes et sa bibliothèque dédiée à la gestion de trafic routier.



**Figure I.9.** Un réseau routier simple avec son intersection et ses feux de signalisations

Pour chacun d’entre eux, nous développerons des *scénarios* avec des contraintes multiples et différentes afin d’avoir un aperçu des fonctionnalités et des potentiels disponibles pour traiter et analyser des flux routiers dans des conditions de circulation dépendantes de l’architecture du réseau, de la topographie du terrain, de la *concentration* des véhicules, de leurs types, des signaux présents, du nombre de voies de circulation, du comportement des conducteurs, etc.