COURS DE THEORIE DE LA CIRCULATION

CIV 6705

LA SIMULATION

Présenté par :

Luc Pellecuer
et
Sandrine Poteau

PLAN

INTRODUCTION 4
1 Définition 4
2 Historique 4
3 Pourquoi simuler ? 4
4 Avantages de la simulation 5
5 Inconvénients de la simulation 5
L'UTILISATION DES MODELES DE SIMULATION 7
1 Quand doit-on utiliser un simulateur : 7
2 Types de modèle de simulation : 7
2.1 Première distinction : 7
2.2 Deuxième distinction : 8
2.3 Troisième distinction : 8
LE DEVELOPPEMENT D'UN MODELE DE SIMULATION 10
1 Les étapes de développement d'un modèle de simulation 10
1.1 L'identification du problème 10
1.2 La simulation est-elle appropriée à la résolution du problème ? 10
1.3 La formulation du problème 10
1.4 Collecte et entrée des données 11
1.5 Formulation du modèle mathématique 11
1.6 Estimation des paramètres 12
1.7 Evaluation de l'état actuel du modèle 12
1.8 Formulation du code informatique 13
1.9 La validation 13
1.10 La conception des essais 14
1.11 Production et analyse des résultats, documentation 14
1.12 Analyse des résultats de la simulation 14
2 Exemple de développement d'un modèle de simulation (TFHRC) 17
2.1 Identification du problème 17
2.2 Formulation du problème 17
2.3 Entrées des données 18
2.4 Formulation mathématique 18
2.5 Estimation des paramètres 20
2.6 Calibration 20
2.7 Vérification 21
2.8 Validation 21
LES OUTILS DE LA SIMULATION 22
1 La méthode Monte Carlo 22

1.1 La marche aléatoire 22
2 Les nombres aléatoires et pseudo aléatoires 25
2.1 Les systèmes numériques 25
2.2 La méthode des résidus 26
3 Des séquences aléatoires satisfaisant des distributions continues 26
3.1 La méthode de l'inversion 27
3.2 La méthode de la distribution des points 29
3.3 Exemple d'application avec la méthode Monte-Carlo 32
4 Les nombres aléatoires et les distributions discrètes 34
5 Les méthodes de conversion spéciale 37
QUELQUES MODELES DE SIMULATION 39
1 Les intersections 39
1.1 TEXAS 39
1.2 CALSIG 41
2 Les réseaux 43
2.1 NETSIM 43
2.2 TRANSYT 43
2.3 AIMSUN 44
3 Les couloirs d'autoroute 45
3.1 INTRAS 45
3.2 FRECON2 47
4 Les autoroutes rurales 47
4.1 TRARR 47
4.2 RURAL 48
5 Les opérations sous contraintes 49
5.1 VISSIM 49

INTRODUCTION

1 Définition

La **simulation** est une technique numérique pour conduire des expériences sur un ordinateur qui peut inclure des caractéristiques stochastiques soit microscopiques soit macroscopiques et implique l'utilisation de modèles mathématiques qui décrivent le comportement d'un système de transport sur des périodes étendues de temps réel.

La simulation de circulation peut servir dans plusieurs cas :

- Choisir entre différentes alternatives de conception
- Tester une nouvelle conception
- Raffiner une nouvelle conception
- Etre intégré dans d'autres outils (pour l'étude d'optimisation d'un feu par exemple)
- Entraîner le personnel de surveillance de réseau
- Etudier la sécurité routière

Un **modèle** est pour sa part une description logique d'un système physique qui prend en compte les comportements que le créateur du modèle considère comme significatifs.

2 Historique

Années 30 : 1ers travaux sur un ordinateur digital
Années 40 : 1eres simulations sur ordinateur : Neumann et Ulam ont résolu des problèmes concernant des boucliers nucléaires qui étaient trop dangereux et chers à expérimenter et trop compliqués pour être étudiés analytiquement.
Années 50 : 1ers travaux de simulation sur le transport sur les autoroutes
Années 60 et 70 : développement des modèles de simulation
1981 : Les modèles de simulation du trafic sont tellement développés aux Etats-Unis qu'une conférence spéciale de 3 jours est tenu à ce sujet et conduite par le Transportation Research Board.

3 Pourquoi simuler ?

1. Bonne manière de rassembler systématiquement des données pertinentes. Cela contribue à une large connaissance des caractéristiques de trafic et de leur opération.
2. Permet de voir les variables importantes et comment elles sont reliées. Cela peut mener éventuellement à des formulations analytiques pertinentes.
3. Parfois on souhaite connaitre les distributions de probabilité plutôt que seulement les moyennes et les variances.
4. Peut parfois permettre de vérifier une solution analytique incertaine.

5. La simulation coute moins cher que de faire des expériences.
6. La simulation donne un contrôle sur le temps. Il est possible d'étudier des effets sur des périodes de temps longues ou au contraire de passer au ralenti certains événements.
7. La simulation est sans danger. On peut étudier divers effets sans déranger les usagers.

4 Avantages de la simulation

- D'autres approches analytiques peuvent ne pas être appropriées.
- Peut être expérimenté en laboratoire sans nécessiter une approche essai-erreur sur le terrain.
- Peut être expérimenté avec de nouvelles situations qui n'existent pas encore aujourd'hui.
- Peut donner une idée des variables importantes et de leurs relations.
- Fournit des informations sur les séquences spatiales et temporelles, pas seulement les centres et les variances.
- Le système peut être étudié en temps réel, en temps compressé ou en temps étendu.
- Des simulations potentiellement peu sécuritaires peuvent être réalisées sans risques pour les usagers du système.
- Il est possible de copier les conditions de base pour effectuer équitablement des comparaisons entre les différentes alternatives d'amélioration.
- Il est possible d'étudier les conséquences d'un changement sur l'opération du système.
- Peut réaliser des procédures de file d'attente interactives.
- Peut transférer des files d'attentes non résorbée d'une période de temps à une autre.
- La demande peut varier à travers le temps et l'espace.
- Des conditions d'arrivée et de départ non habituels qui ne suivent pas des distributions mathématiques traditionnelles peuvent être modélisées.

5 Inconvénients de la simulation

- Il peut exister des solutions plus faciles pour résoudre le problème. Il faut considérer toutes les alternatives possibles.
- La simulation demande du temps et de l'argent. Il faut faire attention de ne pas mal estimer ces derniers.
- Les modèles de simulation exigent un nombre considérable de données et de caractéristiques d'entrée qui peuvent être difficiles voire impossible à obtenir.
- Les modèles de simulation nécessitent une vérification, une calibration et une validation qui, si elles ne sont pas réalisées avec attention, rendent le modèle inutile.
- Le développement d'un modèle de simulation exige des connaissances dans un grand nombre de disciplines, y compris la théorie d'écoulement du trafic, la programmation, les probabilités, la prise de décision et l'analyse statistique.
- La simulation n'est possible que si le développeur comprend parfaitement le système.
- Le modèle de simulation peut être difficile à comprendre pour les personnes qui n'ont pas développé le programme en raison du manque de documentation.

- Certains utilisateurs peuvent appliquer le modèle sans chercher à comprendre son fonctionnement et ce qu'il représente.
- Certains utilisateurs peuvent appliquer le modèle sans connaitre et apprécier les limites.

L'UTILISATION DES MODELES DE SIMULATION

1 Quand doit-on utiliser un simulateur :

- Lorsque les mathématiques sont inapplicables. A cause des échelles temporelles et spatiales ou bien de la complexité de la situation.
- Lorsque, à cause des hypothèses sous-jacentes, on doute de la précision et de l'applicabilité des résultats donnés par les procédures mathématiques et heuristiques classiques.
- Lorsque les mathématiques donnent un résultat statique (alors qu'il devrait être dynamique).
- Lorsqu'il y a un besoin de visualiser la circulation
- Lorsque la congestion persiste au-delà d'un temps significatif

On doit souligner que la simulation de la circulation ne peut pas *remplacer* les procédures d'estimation de capacité, les modèles d'optimisation, les modélisations de la demande etc. La simulation ne peut que supporter ces actions en tant qu'outils d'analyse supplémentaires ou en étant intégrée comme sous-modèle.

2 Types de modèle de simulation :

2.1 <u>Première distinction :</u>

Pratiquement tous les modèles de simulation de la circulation sont dynamiques et ont pour variable indépendante de base le temps.
Il existe cependant deux principaux types de modèles :

- Continus (changement continu d'état avec stimuli continu)
- Discrets (succession d'états changeant brusquement d'un instant à son suivant)

Les modèles discrets peuvent pour leur part être :

- Discrets dans le temps (division du temps en intervalle de longueur constante). Les calculs sont effectués pour chacun des intervalles.
- Discrets dans les événements (division du temps en période s'écoulant entre deux événements connus – les phases d'un feu par exemple). Ce type de modélisation permet de sauver du temps de calcul mais ne peut être avantageusement utilisé que lorsque la circulation change peu d'état ou que la taille du système étudié reste relativement petite.

2.2 Deuxième distinction :

On peut également classer les modèles selon le niveau de détails qu'il propose. Ainsi, on retrouve :

- Modèles microscopiques (MI). Ils rendent compte, à un haut niveau de détails, des objets du système ainsi que de leurs interactions. (ex : changement de voie, selon l'interaction entre véhicules impliqués)
- Modèles mésoscopiques (ME). Ils représentent la plupart des objets à un haut niveau de détails mais leurs interactions à un niveau de détails relativement moindre. (ex : changement de voie, selon densité relative des voies)
- Modèles macroscopiques (MA). Représentent à un faible niveau de détails les objets et leurs interactions. (ex : flux de circulation par voie, représentation agrégée qui ne visualise pas la manœuvre de changement de voie)

Les MI sont relativement plus chers à développer, à faire tourner (en temps) et à mettre à jour. Ils possèdent potentiellement une plus grande finesse de résultats qui n'est pas forcément atteinte à cause de leur complexité et de la calibration de leurs nombreux paramètres.
Les ME et MA sont moins précis que les MI mais sont moins chers. Ils peuvent parfois produire des résultats pas assez précis ou inadéquats. On peut les utiliser lorsque :

- Les résultats attendus ne sont pas sensibles aux détails microscopiques
- L'échelle d'exécution est trop petite. Trop de temps est nécessaire pour les calculs.
- Les ressources et le temps nécessaires au développement d'un MI sont trop limités.

Le créateur du modèle doit donc choisir le niveau de détails en fonction de ce que l'on désire montrer ou ce dont l'on veut rendre compte.

2.3 Troisième distinction :

Une autre classification permet de distinguer les modèles de simulation selon le type des variables utilisées :

- Modèles déterministes. Aucune variable aléatoire : les relations sont de type mathématique, statistique ou logique.
- Modèles stochastiques. Incluant des fonctions de probabilités.

Par exemple, les modèles de poursuite peuvent être déterministe (le temps de réaction du conducteur est une constante) ou stochastique (le temps de réaction du conducteur est aléatoire).

Table 10.2
Representative Traffic Simulation Models

Name	Discrete Time	Discrete Event	Micro	Mesoscopic	Macro	Deterministic	Stochastic
NETSIM	X		X				X
NETFLO 1		X		X			X
NETFLO 2	X				X	X	
FREFLO	X				X	X	
ROADSIM	X		X				X
FRESIM	X		X				X
CORSIM	X		X				X
INTEGRATION	X		X				X
DYNASMART	X			X		X	
CARSIM	X		X				X
TRANSIMS	X			X			X

Source : THFRC

LE DEVELOPPEMENT D'UN MODELE DE SIMULATION

1 Les étapes de développement d'un modèle de simulation

1.1 L'identification du problème

Il faut définir le problème explicitement :
Quelles sont les sorties désirées ?
Quelles entrées affectent les sorties ?
Quelles sont les limites temporelles et spatiales du problème ?
Y a-t-il d'importants éléments stochastiques dans la procédure ?
Les particules individuelles ont-elles besoin d'être modélisées ?
Des files d'attente sont-elles impliquées ?
Les conditions de trafic varient-elles au cours du temps ?
…

1.2 La simulation est-elle appropriée à la résolution du problème ?

Il faut se poser certaines questions :
Comment le problème pourrait-il être résolu sans simulation ?
Pourquoi la simulation est-elle la meilleure solution ?
Comment d'autres ont-ils déjà résolu ce type de problème ?
Le problème peut-il réellement être résolu ?

1.3 La formulation du problème

On réalise d'abord un graphique composé des trois activités reliées :

Ceci a pour but d'identifier toutes les entrées dont on a besoin pour le modèle et d'y associer les sorties pour pouvoir collecter les données à l'étape suivante.
Les entrées incluent généralement les éléments de design d'une installation, les conditions de demande de trafic, les règles d'opération et/ou les contrôles et les conditions de l'environnement.

Les sorties dépendent du type de problème mais peuvent inclure des mesures d'efficacité comme le temps de parcours, le retard, la consommation d'essence, les accidents, la pollution, le bruit, la longueur de la queue, les arrêts…

1.4 Collecte et entrée des données

La collecte des données se base sur les entrées et sorties définies précédemment. On procède comme suit :
Observer le système de trafic à étudier et collecter au début seulement un échantillon de données.
Faire une revue de littérature sur les simulations et études précédentes.
Faire un plan de collecte des données.
Adapter la taille des échantillons à la calibration et la validation.
Etudier les données collectées pour qu'elles soient compatibles avec les besoins du modèle de simulation (calcul de centre et de déviation, analyses des distributions, régressions, conversion des unités).

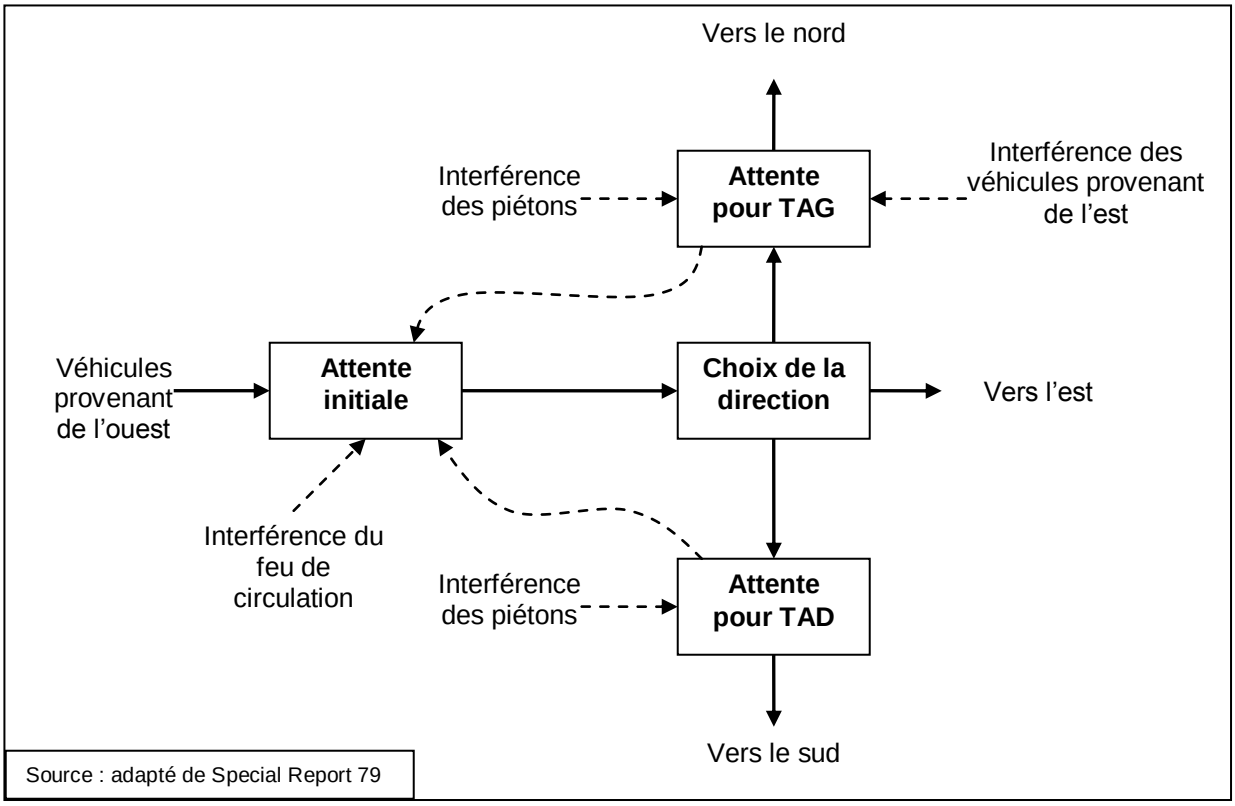
1.5 Formulation du modèle mathématique

Etape la plus importante et la plus longue.

3 étapes :

- On se concentre sur la procédure qui relie l'entrée à la sortie.

Exemple d'un schéma fonctionnel servant de support à l'élaboration d'un modèle : le cas d'une intersection.



- ❖ On identifie ensuite les principales sous-routines et leurs relations.
- ❖ On détaille chaque sous-routine.

1.6 Estimation des paramètres

Certains paramètres sont déterministes alors que d'autres sont stochastiques.

Paramètres déterministes : peuvent être constants pour toutes les situations, prendre différentes valeurs constantes selon le type de situation ou peuvent varier de manière continue selon certaines formes de régression.

Paramètres stochastiques : ont besoin d'un centre et d'une déviation ainsi que d'une forme de distribution identifiée. Peut être très simple ou au contraire très complexe. La balance entre réalisme et simplicité est souvent testée à ce niveau de la simulation.

1.7 Evaluation de l'état actuel du modèle

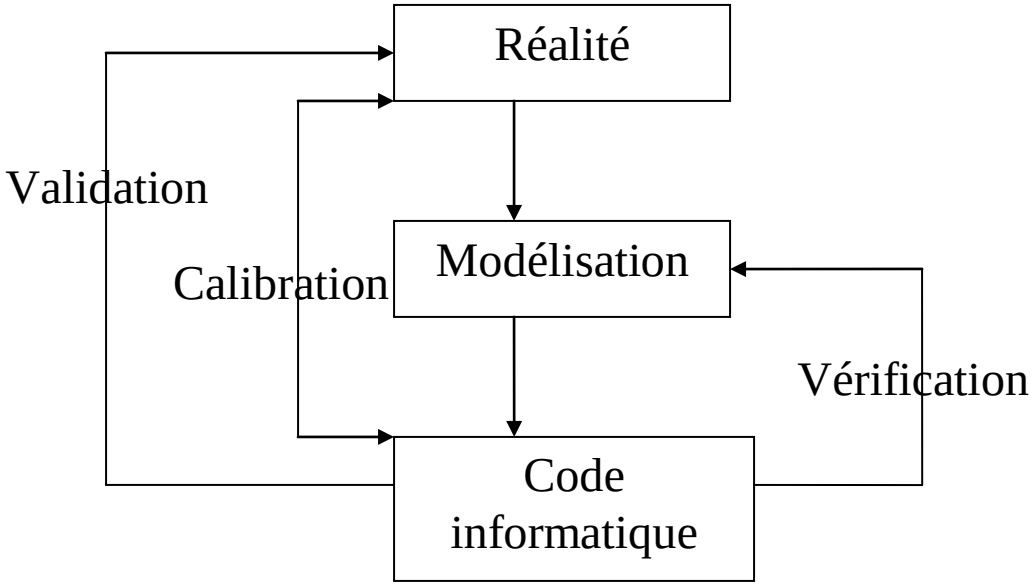
Réaliser des solutions calculées à la main pour identifier les boucles incomplètes ou les boucles fermées, pour vérifier la flexibilité de l'entrée des données et des valeurs et pour s'assurer de la cohérence des résultats. On peut alors modifier des variables, des paramètres ou la structure du modèle.
A ce stade, on peut décider d'accepter ou de rejeter le modèle développé. Si on rejette le modèle, on peut alors redéfinir certains éléments.

1.8 Formulation du code informatique

Relativement simple si l'étape 5 a été bien réalisée.
Il est important de bien choisir le langage informatique. On considère certains facteurs comme la connaissance des langages informatique des développeurs, la disponibilité de compilateurs sur les installations, la compatibilité des caractéristiques du modèle avec le langage de simulation et dans quelle mesure d'autres personnes utiliseront le modèle de simulation sur d'autres installations.
Si le programme va être utilisé puis éventuellement modifié par d'autres personnes, il est important d'insérer de nombreux commentaires dans le programme.
Finalement, on débugge le code informatique. Pour cela, voici quelques conseils :
Debugger une sous routine à la fois et ensuite commencer à les regrouper.
Utiliser au départ des données déterministes connues plutôt que des données stochastiques.
Effectuer des calculs manuels pour vérifier.
Ajouter des sorties intermédiaires temporairement.
Regarder plus d'une erreur à la fois.
Se souvenir que le code représente une modélisation pour l'instant, pas nécessairement la réalité.

1.9 La validation

Inclut la vérification, la calibration et la validation.



La vérification est une forme exhaustive du débogage précédent du code. L'objectif est de s'assurer que le code réalise exactement ce que l'on souhaite dans la modélisation.
La calibration dépend de la qualité des relevés sur le terrain, de la facilité de compréhension du modèle et de la complexité du modèle étudié. Seule une partie des données peut être utilisée pour la calibration. On peut réaliser des ajustements pour que les sorties correspondent aux observations.
La validation permet de comparer les données calculées par l'ordinateur et les données mesurées sur le terrain. Aucun ajustement n'est fait au modèle et les différences montrent dans quelle mesure le modèle représente la réalité avec les conditions choisies.
Si les résultats de la validation sont acceptables, le modèle de simulation est prêt pour les applications. Sinon, il faut effectuer d'autres calibrations et validations.

1.10 La conception des essais

Toutes les applications issues de modèles de simulation nécessitent un cadre d'expérimentation. Sa compréhensibilité dépend la taille et de la flexibilité du modèle ainsi que de la complexité et de la variété des situations à évaluer. On peut considérer ces suggestions :
Identifier le contrôle des variables.
Sélectionner des limites pour chaque variable de contrôle.
Sélectionner une taille ou un intervalle pour chaque variable de contrôle.
Sélectionner des variables de contrôle primaire et garder les variables de contrôle secondaire comme constantes.
Penser à faire varier les variables de contrôle primaire automatiquement dans les boucles à l'intérieur du code.
Penser à introduire une procédure de recherche à l'intérieur du code pour déterminer automatiquement les conditions optimales.

1.11 Production et analyse des résultats, documentation

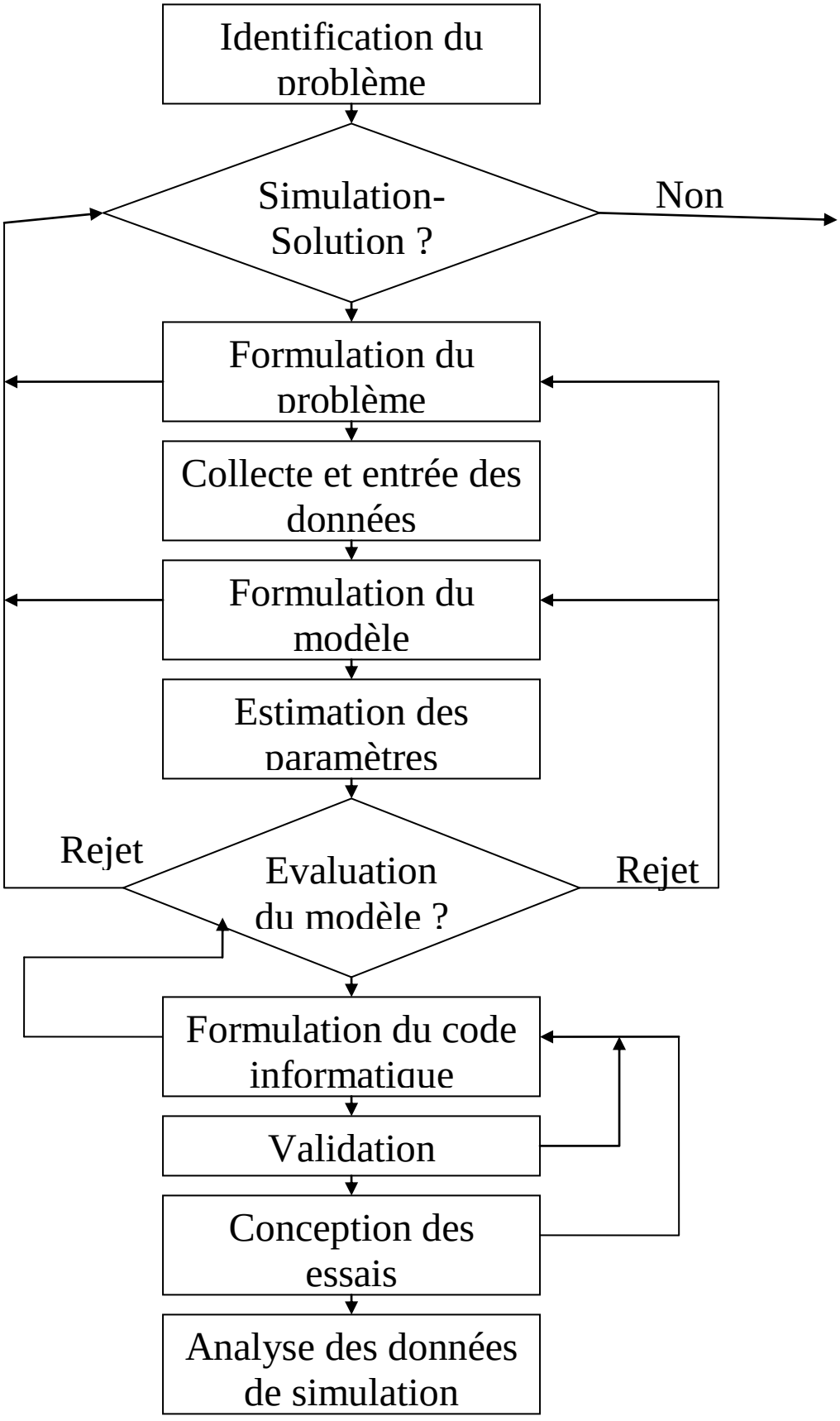
Toutes les simulations devraient être sauvegardées et le code devrait offrir la possibilité de nommer toutes les sorties de résultat.
L'analyse des résultats peut révéler que le code doit être modifié ou qu'il faut utiliser d'autres logiciels pour représenter graphiquement les résultats, pour réaliser des tests statistiques ou pour mettre en forme les résultats.

La documentation ne devrait pas seulement contenir les résultats obtenus. Elle devrait également contenir un manuel pour l'utilisateur et pour l'opérateur du système. Toutes les variables devraient être listées et définies, un diagramme de fonctionnement devrait être inséré, le code devrait être fourni ainsi que des commentaires et enfin, un exemple de problème contenant des entrées et des sorties devrait être ajouté.

1.12 Analyse des résultats de la simulation

La plupart du temps, beaucoup de ressources sont allouées (de façon plus ou moins directe) au développement du modèle de simulation mais peu à l'analyse de ses sorties.
Attention lorsque le modèle est heuristique : plusieurs sorties sont nécessaires pour analyser correctement la situation.

De plus, les sorties sont la plupart du temps auto-corrélées. Donner les intervalles de confiances pour chaque valeur de sortie.


Identification du problème
Simulation-Solution ?
Non
Formulation du problème
Collecte et entrée des données
Formulation du modèle
Estimation des paramètres
Rejet
Evaluation du modèle ?
Rejet
Formulation du code informatique
Validation
Conception des essais
Analyse des données de simulation

2 Exemple de développement d'un modèle de simulation (TFHRC)

2.1 Identification du problème

On possède un modèle microscopique et stochastique de simulation du trafic sur autoroute. Ce modèle ne prend pas en compte les manœuvres de changement de voie et il donne des résultats incertains.
On veut donc intégrer les changements de voie pour rendre le modèle plus fiable. On désire obtenir un résultat pour chaque type de véhicule et pour chaque type de changement de ligne (à droite ou à gauche).

2.2 Formulation du problème

Dans le modèle à améliorer, les positions des véhicules sont prises à un intervalle de temps Δt constant. Les positions des véhicules sont successivement calculées en commençant par celle du véhicule de tête.
Les caractéristiques utilisées pour le modèle déjà existant sont :

- Autoroute à trois voies par sens de circulation
- Trois types de véhicules : voiture, camion non-articulé et camion articulé

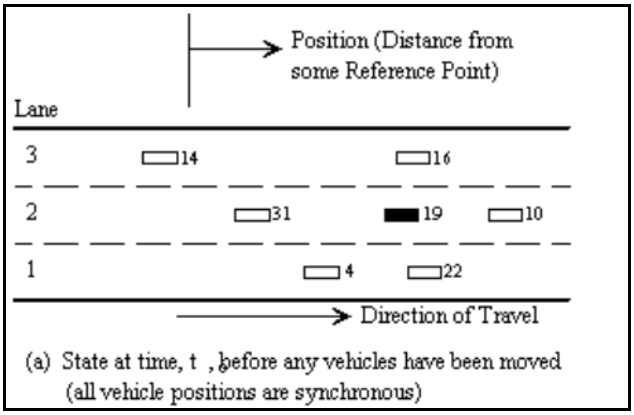
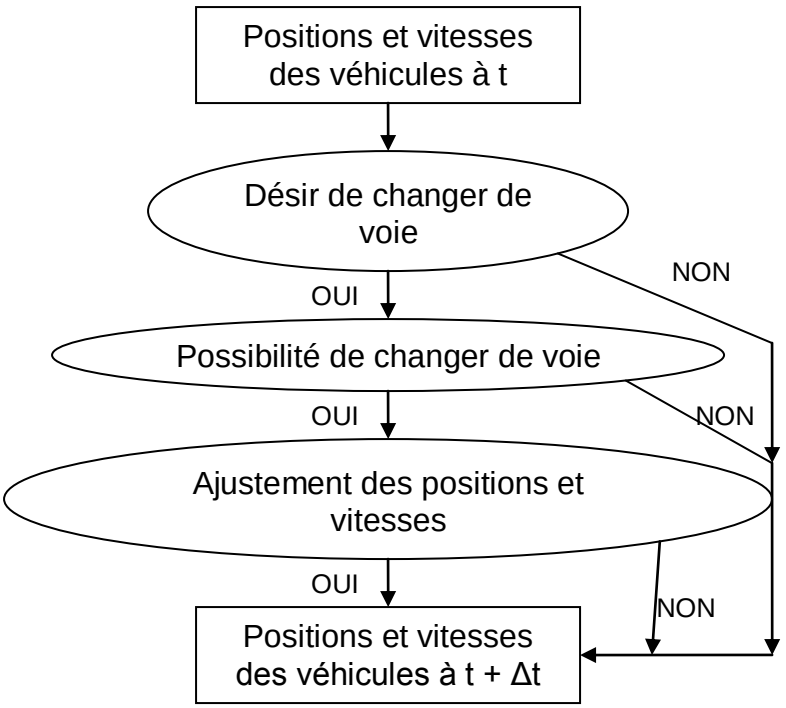


Figure 1: Positions à l'instant t

La position de chaque véhicule étant donnée, le mécanisme de changement de voie pour chaque véhicule peut être représenté par le diagramme suivant :



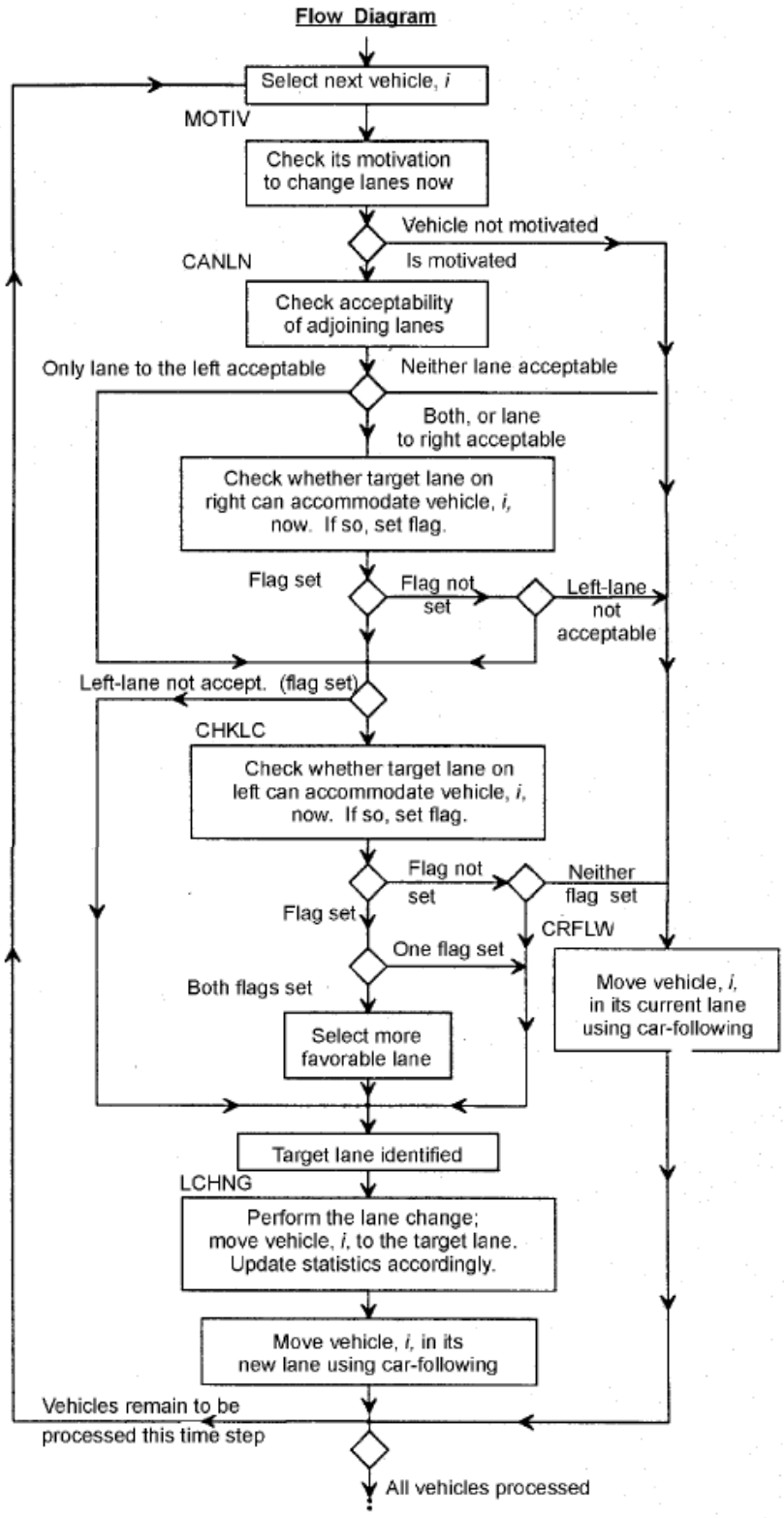
2.3 Entrées des données

Les données à entrer dans le modèle sont déduites de la formulation précédente :

- Position des véhicules à l'instant t (calculé par le modèle déjà existant)
- Vitesse désirée (pour chaque type de véhicule) qui influe directement sur le désir de changer de voie
- Réaction des conducteurs suiveurs (pour chaque type de véhicule) qui influe directement sur la décélération maximale admise par les conducteurs

2.4 Formulation mathématique

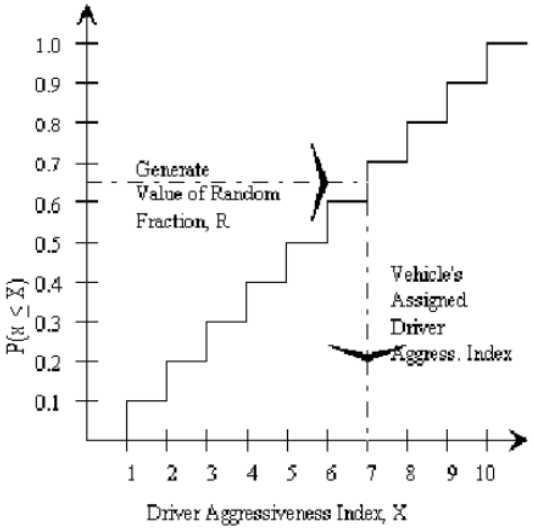
Il faut trouver les liens logiques et les fonctions qui lient les positions des véhicules entre eux. On peut ainsi développer le diagramme suivant :

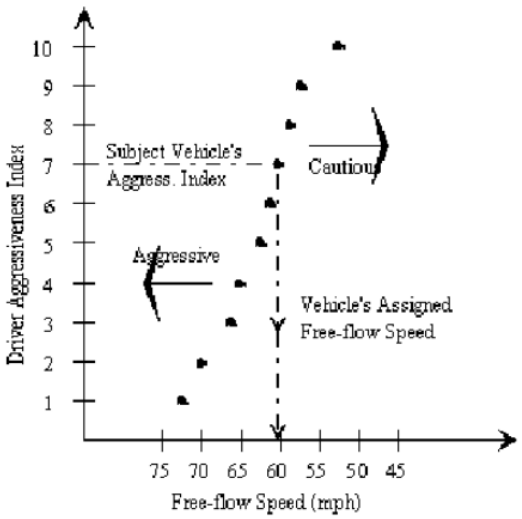

Flow Diagram
Select next vehicle, i
MOTIV
Check its motivation to change lanes now
Vehicle not motivated
CANLN
Is motivated
Check acceptability of adjoining lanes
Only lane to the left acceptable
Neither lane acceptable
Both, or lane to right acceptable
Check whether target lane on right can accommodate vehicle, i, now. If so, set flag.
Flag set
Flag not set
Left-lane not acceptable
Left-lane not accept. (flag set)
CHKLC
Check whether target lane on left can accommodate vehicle, i, now. If so, set flag.
Flag not set
Neither flag set
Flag set
CRFLW
One flag set
Move vehicle, i, in its current lane using car-following
Both flags set
Select more favorable lane
Target lane identified
LCHNG
Perform the lane change; move vehicle, i, to the target lane. Update statistics accordingly.
Move vehicle, i, in its new lane using car-following
Vehicles remain to be processed this time step
All vehicles processed

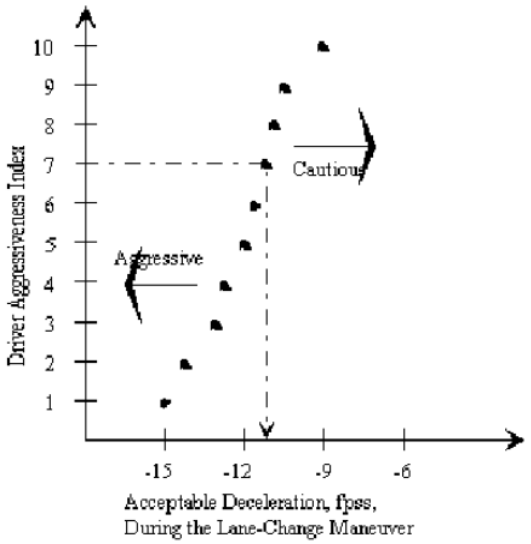
2.5 Estimation des paramètres

La vitesse de prédilection et la décélération maximale admise représentent les paramètres à estimer pour chaque conducteur. Ces deux caractéristiques dépendent en effet du conducteur considéré et de son tempérament. La méthode retenue pour l'estimation de ces paramètres consiste à assigner aléatoirement à chaque conducteur un indice d'agressivité qui renseigne par la suite sur sa vitesse de prédilection et sa réaction en tant que suiveur.

Les valeurs des entrées sont ainsi déterminées selon l'indice d'agressivité du conducteur, qui est un nombre aléatoire compris entre 1 (conducteur agressif) et 10 (conducteur prudent) :







2.6 Calibration

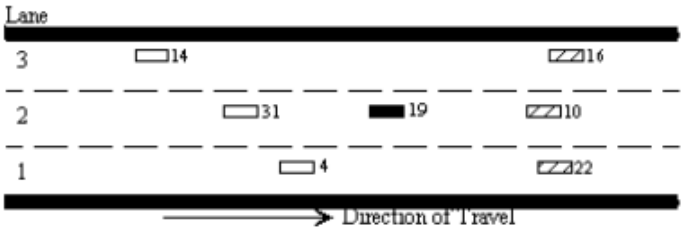
Dans le cas présent calibration concerne les paramètres entrés. Cette calibration est effectuée par confrontation avec les mesures prises sur le terrain.

2.7 Vérification

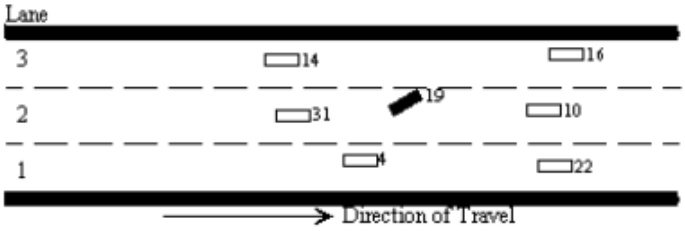
Vérification des bugs éventuels

2.8 Validation

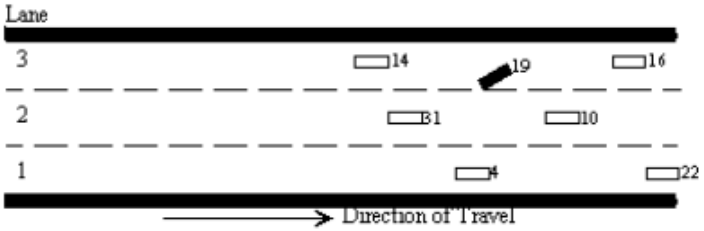
Vérification visuelle de la cohérence des positions des véhicules par simulation



(b) State after vehicles 10, 16 and 22 have been moved (to t + t); △ the others have not been processed as yet (at t)



(c) State at time, t + t; vehicle positions are synchronous

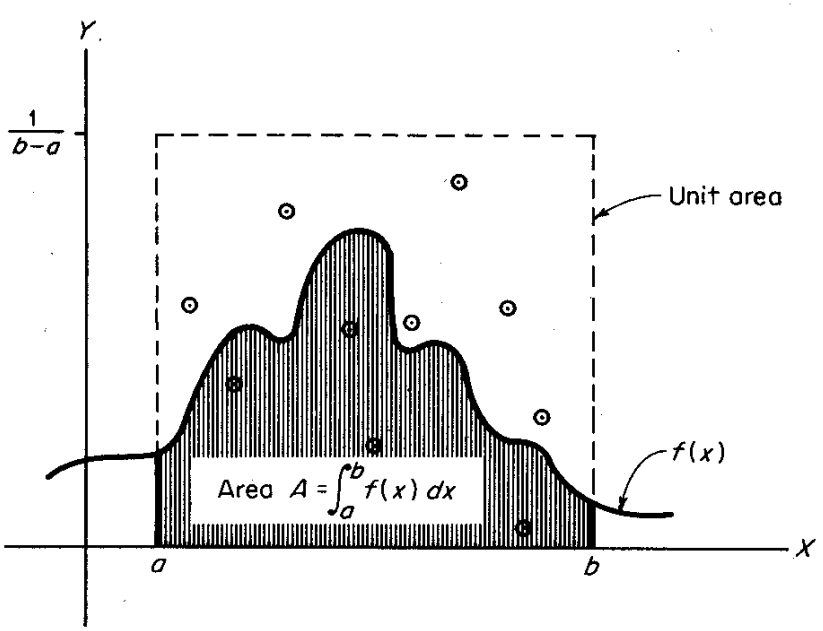


(d) State at time, t + 2 t; vehicle positions are synchronous

LES OUTILS DE LA SIMULATION

1 La méthode Monte Carlo

Souvent on trouve dans les modèles des équations qui ne peuvent pas être résolues par des techniques numériques standard. Il peut alors être plus efficace de construire un modèle stochastique analogue. La procédure de calcul est entièrement numérique et est effectuée en introduisant des nombres aléatoires dans le système pour obtenir des réponses numériques.
Pour cela, on évalue une intégrale multidimensionnelle. Si on veut évaluer l'aire d'une surface définie, on entoure la forme d'un carré normalisé pour qu'un coté soit une unité de longueur. Si on prend un point au hasard dans la forme, la probabilité pour qu'il soit dans l'aire A est A. Si on prend un grand nombre de points au hasard, la proportion de points qui est dans la forme est une estimation de A.



Note : $A = \frac{4}{4+6} = 0.4$ based on 10 pairs of random numbers

Fig. 11.1 Monte Carlo evaluation of an integral.

1.1 La marche aléatoire

Une autre origine de la simulation est le besoin de résoudre des problèmes impliquant des équations à dérivées partielles. La technique qui consiste à s'occuper de particules qui se

déplacent de manière partiellement régulière, partiellement aléatoire est étudiée sous le nom de marches aléatoires.

Si on considère un plateau rectangulaire avec des faces limitées par x =0, y=0, x=3 et y=2 Le côté défini par y=0 est tenu à la température $u(x)=3x - x^2$, les trois autres côtés sont à la température 0°.
On étudie la température à n'importe quel point (x,y) avec la méthode Monte Carlo.

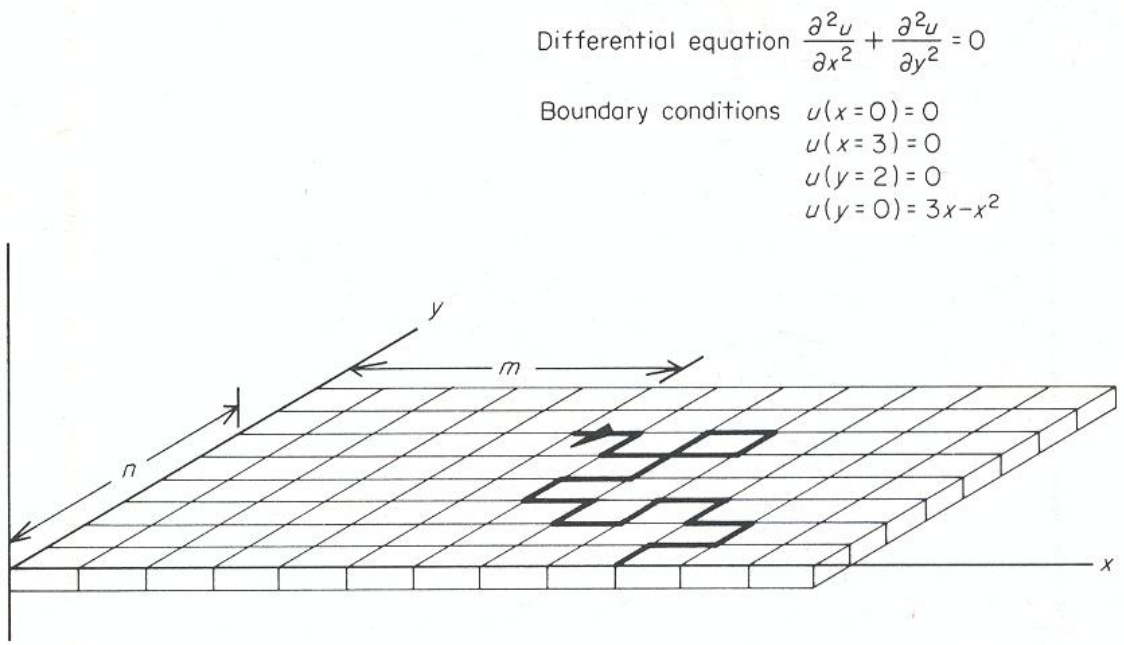


Fig. 11.4 Random-walk technique for finding the steady-state temperature at a point on a plate.

Une méthode est de couvrir le disque avec une grille dont les carreaux sont espacés de h et de considérer la température selon les conditions initiales. Pour trouver la température à n'importe quel point (m,n), on commence par ce point (m,n) et on prend une marche aléatoire jusqu'à un point de la bordure qu'on atteint. On regarde la température à ce point de la bordure, on retourne au point de départ et on recommence la procédure. La moyenne des températures trouvées aux points de la bordure atteints fournissent une estimation de la température désirée u(m,n) au point de départ.

La théorie derrière cette procédure implique de transformer l'équation à dérivées partielles en une équation différenciée :

$$\frac{u(m+1,n) - 2u(m,n) + u(m-1,n)}{\overline{\Delta x}^2} + \frac{u(m,n+1) - 2u(m,n) + u(m,n-1)}{\overline{\Delta y}^2} = 0$$

Puisque on a, en raison de la grille :

$$\Delta x = \Delta y = h$$

On obtient :

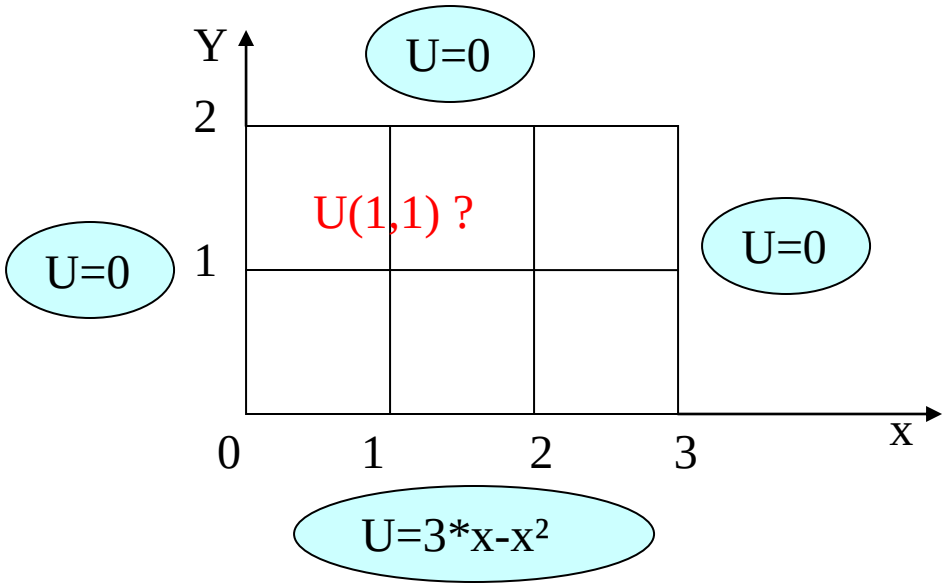
$$u(m,n) = \tfrac{1}{4}[u(m+1,n) + u(m-1,n) + u(m,n+1) + u(m,n-1)]$$

Cette équation donne la température désirée en termes de températures des quatre points entourant le point considéré.
En d'autres termes, la température au point (m,n) est égale à la probabilité que le premier pas soit (m+1,n) fois la température (m+1,n) plus la probabilité que le premier pas soit (m-1,n) fois la température (m-1,n)…
De cette façon, on peut démontrer que la température u(m,n) est la somme des produits de la température à un point de la bordure (dont on connait la température) fois la probabilité qu'une marche aléatoire à partir de (m,n)nous conduise à ce point de la bordure.
Ainsi, en pratique, il faut programmer environ 1000 marches aléatoires et calculer la température moyenne aux points de la bordure pour avoir une bonne estimation de la température désirée.

Exemple :

On considère un plateau rectangulaire avec des faces limitées par x =0, y=0, x=3 et y=2 Le côté défini par y=0 est tenu à la température u(x)=3x – x², les trois autres côtés sont à la température 0°.
On cherche la température au point (1,1).

On découpe le plateau en carrés de côté h=1.



$$u(1,1) = \frac{1}{4}[u(2,1) + u(0,1) + u(1,2) + u(1,0)]$$

$$u(1,1) = \frac{1}{4}[u(2,1) + 0 + 0 + 3 \times 1 - 1^2]$$

$$u(1,1) = \frac{1}{4}[u(2,1) + 2]$$

$$u(2,1) = \frac{1}{4}[u(3,1) + u(1,1) + u(2,2) + u(2,0)]$$

$$u(2,1) = \frac{1}{4}[0 + u(1,1) + 0 + 3 \times 2 - 2^2]$$

$$u(2,1) = \frac{1}{4}[u(1,1) + 2]$$

$$u(1,1) = \frac{1}{4}[\frac{1}{4} \times (u(1,1) + 2) + 2]$$

$$u(1,1) = \frac{1}{16}u(1,1) + \frac{5}{8}$$

$$u(1,1) = \frac{5}{8} \times \frac{16}{15}$$

$$u(1,1) = \frac{2}{3} = 0,67^\circ$$

$$u(2,1) = \frac{2}{3} = 0,67^\circ$$

Moore a montré comment généraliser cette procédure pour résoudre une classe plus étendue d'équations à dérivées partielles que l'équation de Laplace.

2 Les nombres aléatoires et pseudo aléatoires

Il est impossible de générer une suite de nombres entièrement aléatoires à partir d'algorithme ne contenant pas d'aléatoire. On utilise donc le terme « pseudo-aléatoire ».

2.1 Les systèmes numériques

Souvent en informatique, les nombres sont représentés dans le système binaire plutôt que dans le système décimal.
La base d'un système numérique b est appelé le radical.

$$R = \sum_{i=-j}^{n-1} a_i b^i$$

2.2 La méthode des résidus

Congruence entre A et B modulo C :

A = B mod C $\Leftrightarrow$ $\frac{|A - B|}{C} = D$ avec D un entier.

Une méthode pour générer des nombres pseudo-aléatoires :

Soit S_0 le nombre de départ (la graine). Le calcul des nombres aléatoires se fait alors à l'aide de la formule de récursion :
$S_m = (a\ S_{m-1} + c) \bmod b^n$

Avec S_m le *m*ième nombre aléatoire, b le radical et n la longueur du chiffre dans ce système.

S_0 est préférablement un nombre entier. c représente le maximum de la période du générateur. Le choix de la graine et des paramètres a une forte influence sur le caractère aléatoire de la série de chiffres générés.
On peut par exemple prendre a = 16 807, c = 0, et $b^n = 2^{31}-1$

La i^{ème} fraction aléatoire, comprise dans l'intervalle [0 ; 1], est alors : $R_i = \frac{S_i}{b^n}$

Pour avoir un nombre compris dans l'intervalle [j ; k] :
$C_i = (k - j) * R_i + j$

Pour un système de circulation, beaucoup de variables peuvent être prises en compte (variables concernant la route, le véhicule ou le conducteur). Toutes possèdent un certain comportement scientifique qui peut être approché en utilisant les fonctions de distributions de probabilité qui les décrivent le mieux possible.
On désire alors que les paramètres stochastiques, bien qu'étant aléatoires, suivent une distribution connue par avance.

3 Des séquences aléatoires satisfaisant des distributions continues

Des nombres aléatoires peuvent être interprétés comme des entiers aléatoires ou des fractions aléatoires. Les fractions aléatoires sont souvent plus appropriées puisque les problèmes basiques de simulation consistent à échantillonner des distributions statistiques qui sont par définition des fractions d'unité.

2 méthodes principales pour convertir des fractions aléatoires en déviations aléatoires satisfaisant la distribution de fréquence désirée : la méthode de l'inversion et la méthode de la distribution des points.

3.1 La méthode de l'inversion

Si la variable est continue, on considère une fonction de densité f(t) et si la variable est discrète, on considère un ensemble de fréquences. Dans les deux cas, la fonction de distribution cumulée est :

$$P(t < T) = \int_0^T f(t)\, dt$$

On résout cette équation pour une déviation aléatoire T par inversion. Puisque le terme de gauche est équivalent à une fraction comprise entre 0 et 1, on obtient :

$$R = \int_0^T f(t)\, dt$$

Avec R une fraction pseudo aléatoire.

La réussite de cette méthode dépend de la capacité à intégrer f(t) et de la capacité à prendre l'inverse après l'intégration. Certains cas pourtant simples sont impossibles à résoudre de cette façon.

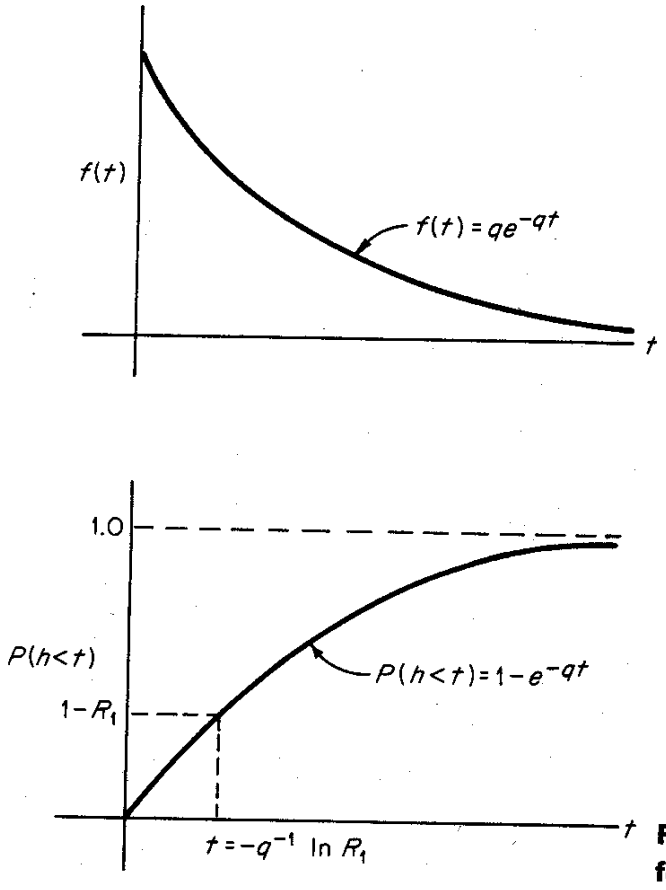


Fig. 11.5 Method of inversion illustrated for the negative exponential distribution.

Les arrivées aléatoires peuvent être décrites à l'aide de la négative exponentielle dont la fonction de densité est :

$$f(t) = qe^{-qt}$$

Avec t le temps d'arrivée en secondes et q le taux d'arrivées en véh/s.
En intégrant, on a :

$$P(t < T) = 1 - e^{-qT}$$

Ou plus généralement :

$$P(h < t) = 1 - e^{-qt}$$

Où h est l'écart entre deux véhicules successifs.

Si R_1 est une fraction aléatoire uniformément distribuée,

$$0 \leq R_1 \leq 1$$

$$0 \leq (1 - R_1) \leq 1$$

Donc

$$1 - R_1 = P(h < t)$$

Puisque P(h<t) est aussi une fraction aléatoire uniformément distribuée, on a
$0 \leq P(h < t) \leq 1$.

On trouve d'après les équations précédentes :

$$R_1 = e^{-qt}$$

Trouver t, une déviation aléatoire satisfaisant la distribution négative exponentielle, est appelé inversion :

$$\ln R_1 = -qt$$

$$t = -q^{-1} \ln R_1$$

Ceci nous montre qu'au lieu de générer une déviation aléatoire négative exponentielle, on peut simplement prendre un logarithme négatif d'une fraction pseudo aléatoire.

Soit ζ l'écart minimum entre deux véhicules successifs, la distribution négative exponentielle devrait être prise telle que la probabilité que l'écart entre deux véhicules successifs inférieur à ζ est nulle.

$$P(h < \tau) = 0$$

$$P(\tau < h < t) = 1 - e^{-(t-\tau)/(\bar{t}-\tau)}$$

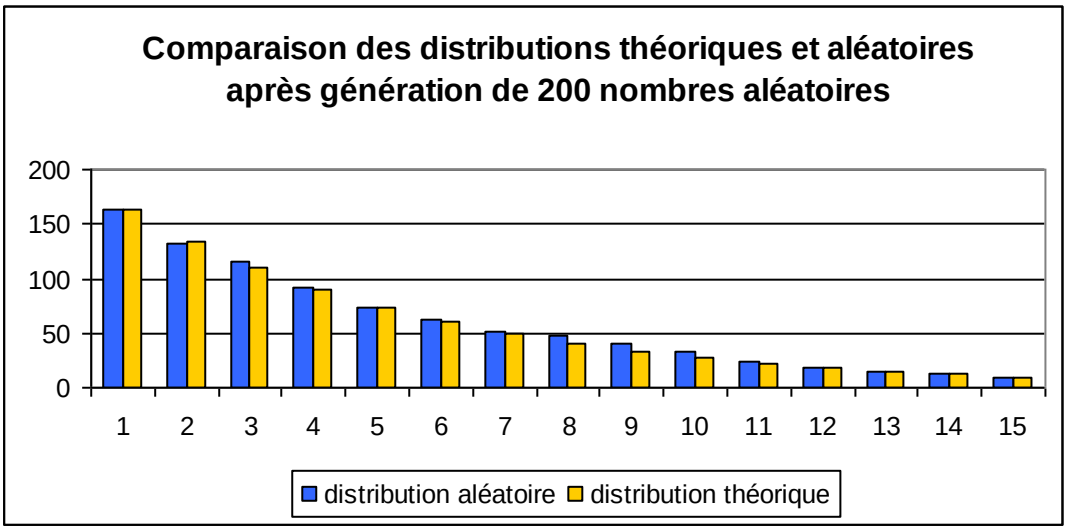
L'inversion donne :

$$t = \tau - (\bar{t} - \tau) \ln R_1$$

Lorsque la méthode de l'inversion est impossible à réaliser (souvent dans le cas de distributions normales… ou si l'étape de l'inversion n'est pas possible) on utilise la méthode la distribution des points.

Exemple :
Cas d'une distribution des écarts supposée être exponentielle de moyenne μ. Un nombre aléatoire suivant cette loi est obtenu par la formule : $D_i = - \mu * \ln(R_i)$.

Si on prend μ = 5, et que l'on génère aléatoirement 200 nombres suivant cette loi négative exponentielle, on obtient le résultat présenté à la figure suivante :



La distribution établie à partir de nombres aléatoires semble donc bien suivre une loi négative exponentielle. ($chi2_{calculé}$ = 13.6, $chi2_{tabulé}$ = 30)

3.2 La méthode de la distribution des points

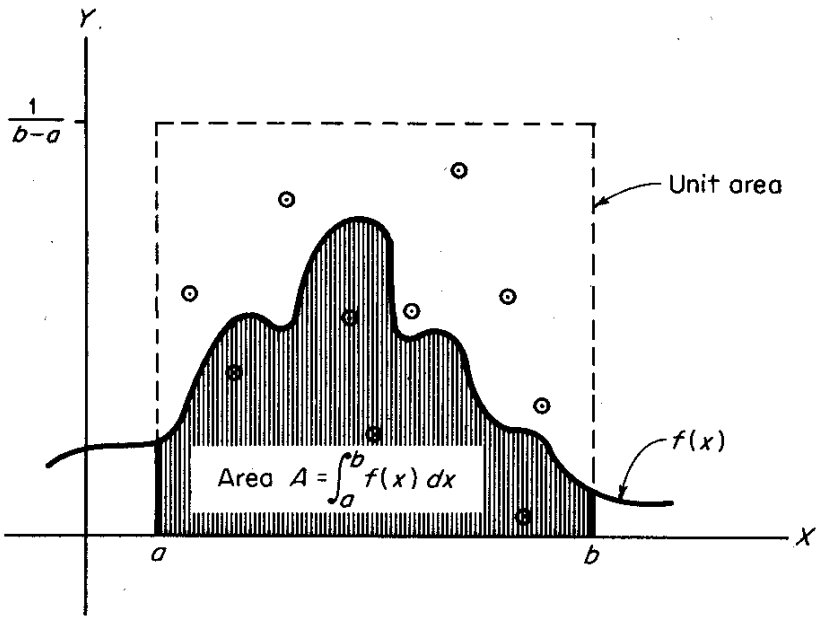
L'équation générale pour évaluer une intégrale définie est, avec la méthode de la distribution des points :

$$\int_a^b f(x)\,dx = (b-a)y_{\max}P[Y < f(X)]$$

Avec :

$$X = (b-a)RN + a$$

$$Y = y_{\max}RN$$



Note : $A = \frac{4}{4+6} = 0.4$ based on 10 pairs of random numbers

Fig. 11.1 Monte Carlo evaluation of an integral.

La méthode de distribution des points consiste à choisir deux nombres aléatoirement, le premier entre a et b et le deuxième entre 0 et un nombre plus grand ou égal au maximum de f(x) dans le segment (a,b) ou y_{max}.
Si on considère le premier chiffre comme abscisse et le deuxième comme ordonnée, la probabilité que le chiffre tombe sous la courbe est égal au ratio de l'aire sous la courbe sur l'aire du rectangle choisi. On a ainsi la base pour trouver la valeur de l'intégrale définie précédemment. Pour cette méthode, la précision est proportionnelle à $n^{1/d}$ avec n le nombre de points et d le nombre de dimensions. On peut généraliser cette méthode pour plusieurs dimensions et le résultat reste valable.

Note :
Une autre méthode plus efficace repose sur le théorème de la valeur moyenne. Ainsi, si f(x) est continue sur le segment (a,b) alors il existe un point T appartenant à (a,b) tel que :

$$\int_a^b f(x)\,dx = (b-a)f(T)$$

Pour réaliser cela, on génère une séquence de nombres aléatoires X compris entre a et b et on calcule la valeur moyenne f(X) :

$$f(T) = n^{-1} \sum_{i=1}^{n} f(X_i)$$

Avec X défini par :

$$X = (b-a)RN + a$$

En général, si on considère une fonction de probabilité bornée telle que:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < t_{\min} \\ f(t) & t_{\min} \leq t \leq t_{\max} \\ 0 & t > t_{\max} \end{cases}$$

On génère 2 nombres aléatoires T_1 et T_2 :

$$T_1 = (t_{\max} - t_{\min})R_1 + t_{\min}$$

$$T_2 = f(t)_{\max} R_2$$

Et on vérifie que T_1 est la déviation aléatoire désirée par le test :

$$f(T_1) \geq T_2$$

Si cette équation est confirmée, T_1 est accepté, sinon on recommence cette étape.

Exemple :

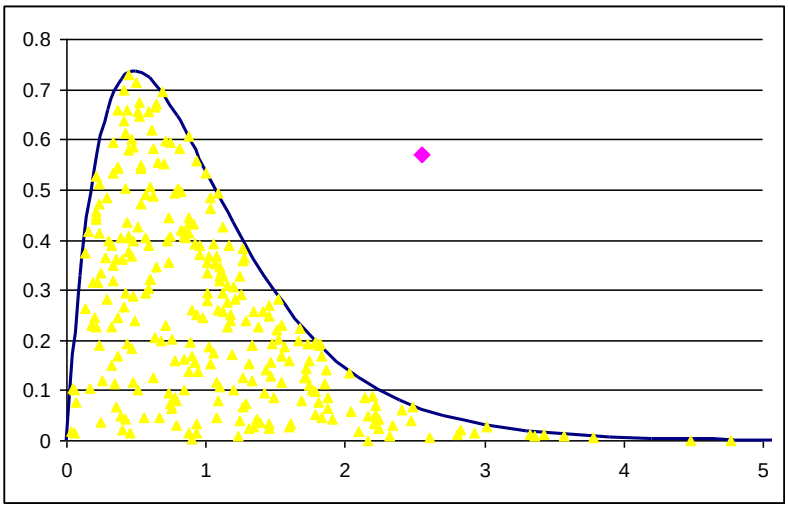
On considère une distribution Erlang pour décrire l'intervalle entre les arrivées de véhicules en file d'attente et pour des phénomènes de trafic particuliers.

La fonction de densité est de la forme :

$$f(t) = \frac{(aq)^a}{(a-1)!} t^{a-1} e^{-aqt}$$

a = 2 et q = 1
tmin = 0 et tmax = 5

En calculant 1000 fractions aléatoires et en ne retenant que les points satisfaisant la condition $f(T_1) \geq T_2$, on obtient la distribution suivante :



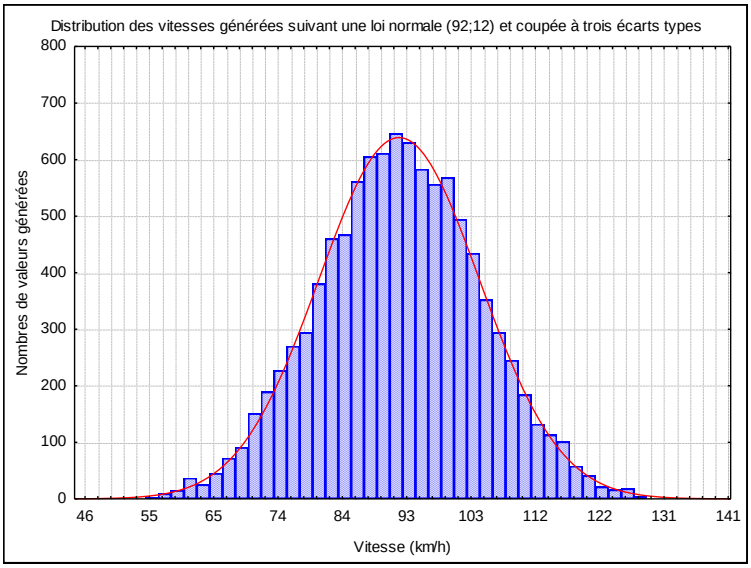
3.3 Exemple d'application avec la méthode Monte-Carlo

La distance de visibilité (DVA) est composée de deux membres : le premier correspond à la distance parcourue lors du temps de réaction et temps mort d'entrée en action des freins et le second reflète la distance effective de freinage :

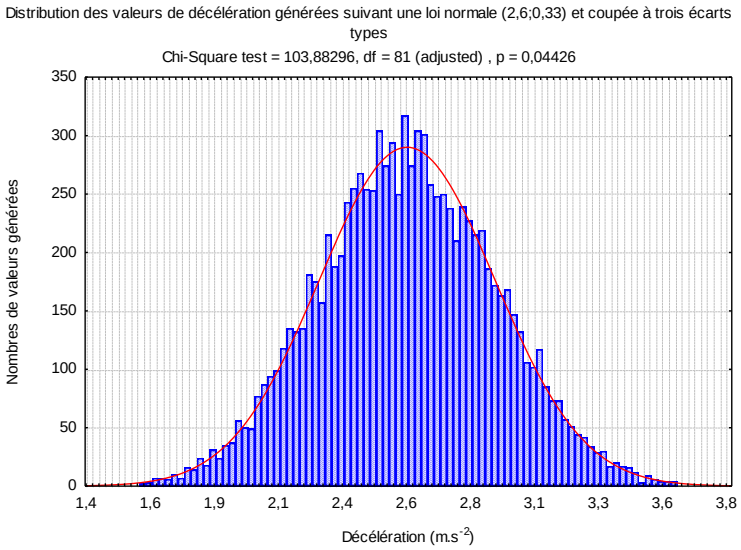
$$DVA = \frac{V \times t_{réaction}}{3.6} + \frac{V^2}{25.92 \times a}$$

Afin de connaître la distribution de la DVA, on se sert des distributions :

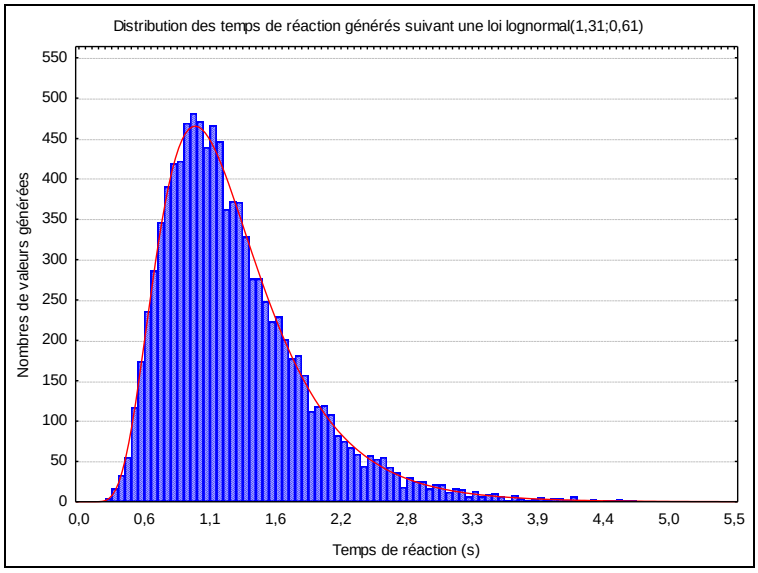
- de la vitesse (distribution normale)



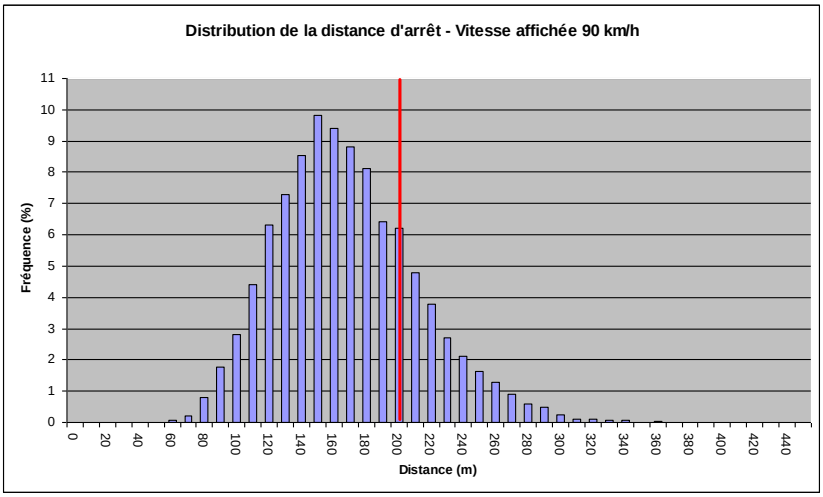
- de la décélération (distribution normale)

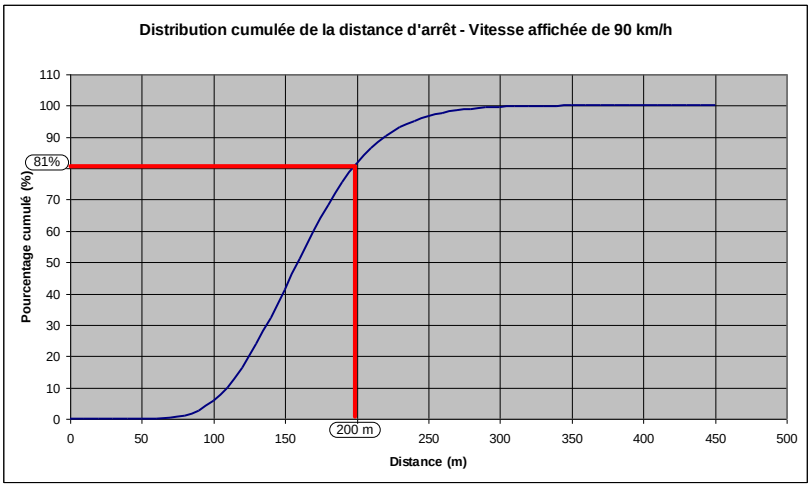


- du temps de réaction (distribution log normale)



Etant donnée la nature des coefficients, la DVA ne peut pas être exprimée facilement de façon analytique. On fait donc appel à la méthode de Monte-Carlo.
3 nombres aléatoires suivant les distributions de la vitesse, de la décélération et du temps de réaction sont calculés afin d'obtenir une première estimation de la DVA. Puis cette génération de nombres aléatoires est répétée jusqu'à ce que le nombre de valeurs de DVA obtenues soit suffisant pour l'exploitation correcte des données ainsi simulées.
Les figures suivantes sont obtenues après le calcul d'environ 10 000 valeurs de DVA (et donc d'autant de triplets de nombres aléatoires pour fin de détermination des coefficients) :





4 Les nombres aléatoires et les distributions discrètes

N'importe quelle série convergente de constantes positives peut être utilisée comme base d'une distribution de probabilité discrète. Cette propriété permet d'obtenir la probabilité que x+1 en fonction de probabilité de x selon la formule de récursion :

$$P(x+1) = k(x)P(x)$$

La fonction de distribution cumulée est alors :

$$P(\leq x) = \sum_{i=0}^{x} P(i)$$

On considère que l'arrivée de véhicules satisfait une distribution discrète. On génère une fraction aléatoire R et on la compare à P(≤x) pour x=0 :

- Si R≤ P(≤0) alors il n'y a pas d'arrivées.
- Si R> P(≤0) on sait seulement qu'il y a plus de 0 arrivées.

On compare à nouveau la fraction aléatoire à P(≤x), mais en prenant x+1 = 1.

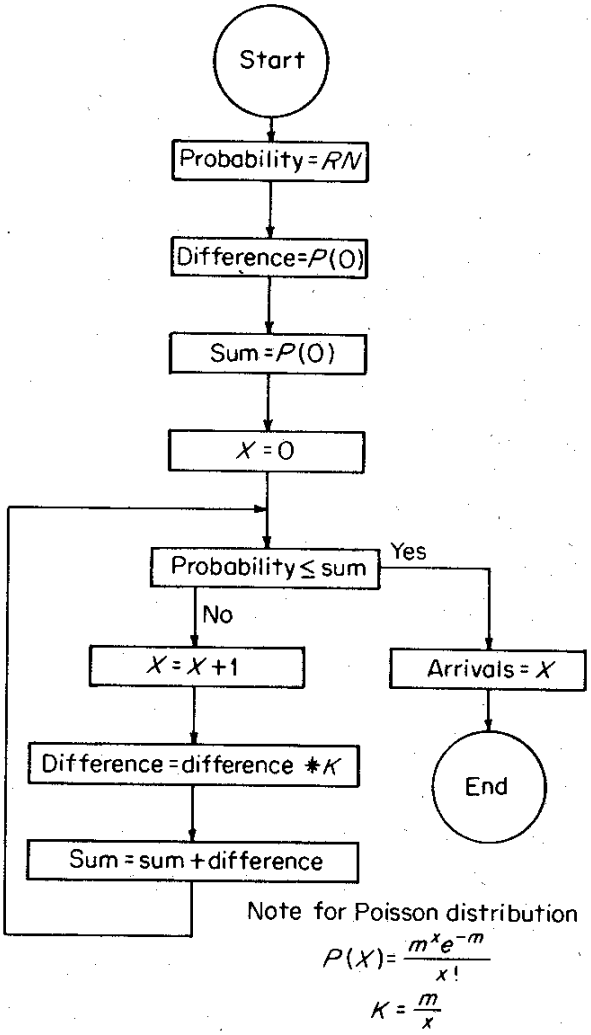
$$R \leq P(\leq x) \qquad x = 1$$

Si cette condition est vérifiée, comme il y a eu au plus une arrivée et il n'y a pas eu zéro, il y a eu exactement une arrivée. Sinon, on reprend la procédure en incrémentant chaque fois x de 1 jusqu'à ce que l'équation suivante soit satisfaite :

$$R \leq P(\leq x)$$

Cette valeur de x est alors choisie comme nombre d'arrivées dans l'intervalle Δt correspondant à la distribution désirée.

Cette procédure est reprise par le diagramme suivant :



Pour une distribution de Poisson, on utilise :

$$k(x) = \frac{m}{x+1}$$

donc

$$P(x) = \frac{m^x e^{-m}}{x!}$$

Pour une distribution binomiale :

$$k(x) = \frac{n-x}{x+1}\frac{p}{1-p}$$

donc

$$P(x) = \binom{n}{x} p^x q^{n-x}$$

Exemple :

On considère que les arrivées suivent une loi de Poisson. On choisit m le nombre moyen d'automobiles dans l'intervalle de temps Δt. On a alors :

$P(0) = e^{-m}$.

$$P(x+1) = k(x)P(x)$$

avec

$$k(x) = \frac{m}{x+1}$$

Pour m = 0.4, on obtient par itération les valeurs suivantes :

m = 0.4

Nombre d'auto dans l'intervalle i	P(i)	ΣP(i)
0	0.670	0.670
1	0.268	0.938
2	0.054	0.992
3	0.007	0.999
4	0.001	1.000
5	5.720E-05	1.000
6	3.813E-06	1.000
7	2.179E-07	1.000
8	1.090E-08	1.000
9	4.842E-10	1.000
10	1.937E-11	1.000

Afin d'obtenir une série de nombres aléatoires suivant une distribution de poisson, on génère une série de fractions aléatoires et, pour chaque fraction, on regarde à quel nombre d'autos dans l'intervalle cela correspond suivant la distribution cumulée.

5 Les méthodes de conversion spéciale

Les méthodes précédentes sont utilisées pour des distributions continues ou discrètes. Cependant certaines distributions ont des caractéristiques qui conduisent à d'autres méthodes de conversion. Une de ces méthodes est basée sur le concept de limite centrale. Le théorème de la limite centrale montre que la somme de variables indépendantes de n'importe quelle distribution est dans une limite normalement distribuée. La rapidité avec laquelle cette limite est atteinte rend ce moyen pratique pour générer des déviations aléatoires satisfaisant une distribution normale.

Exemple :

Une observation d'une distribution uniforme est naturellement distribuée uniformément.
La somme de deux observations d'une distribution uniforme est distribuée selon une distribution triangulaire.
La somme de trois observations d'une même distribution uniforme est parabolique et très proche de la normale désirée.

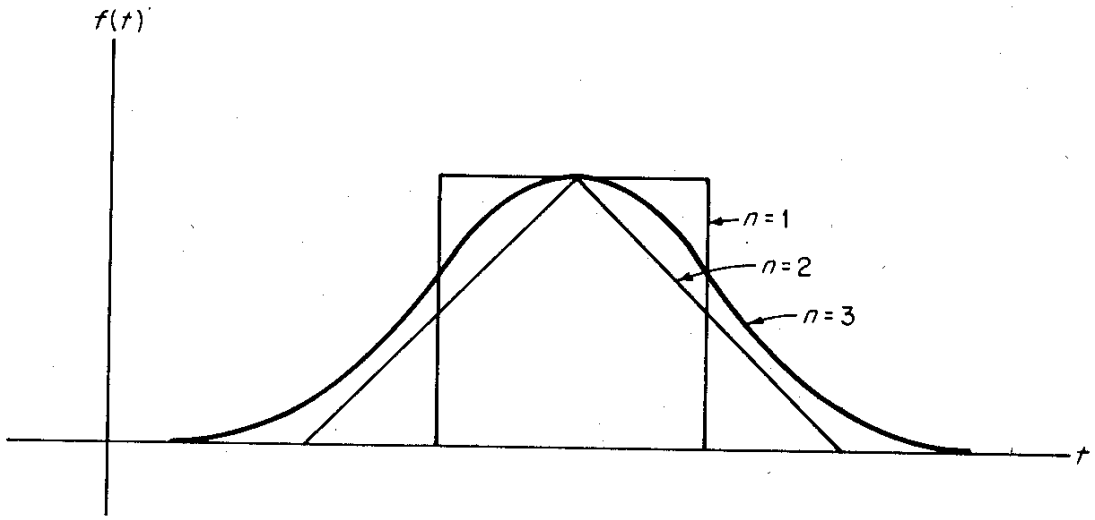
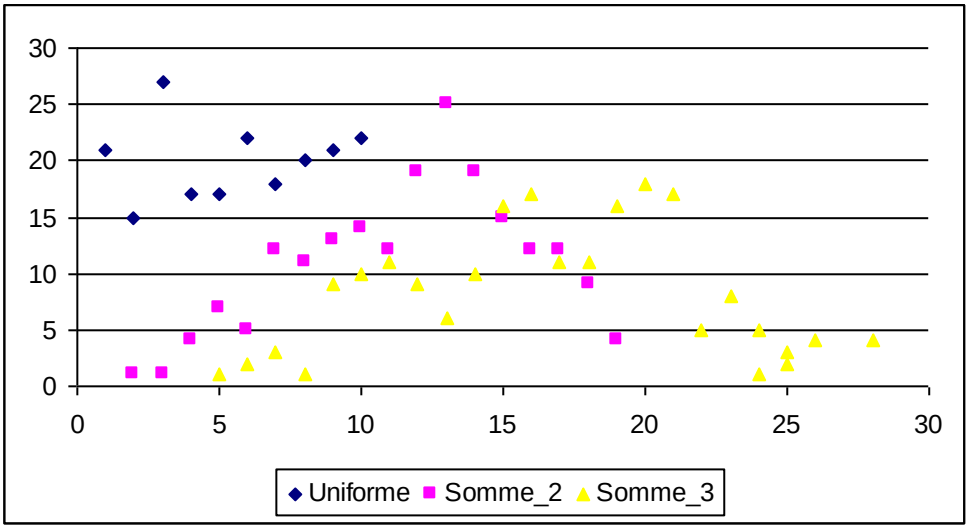


Fig. 11.8 Distribution of sums of *n* observations from a uniform distribution.

Avec 400 fractions aléatoires, on obtient déjà les distributions suivantes :



Il apparaît donc nécessaire de s'assurer que la distribution aléatoire ainsi produite est bien du type désiré.
Si on somme n fractions aléatoires $R_{i,}$ la variable t qui en résulte est distribuée normalement :

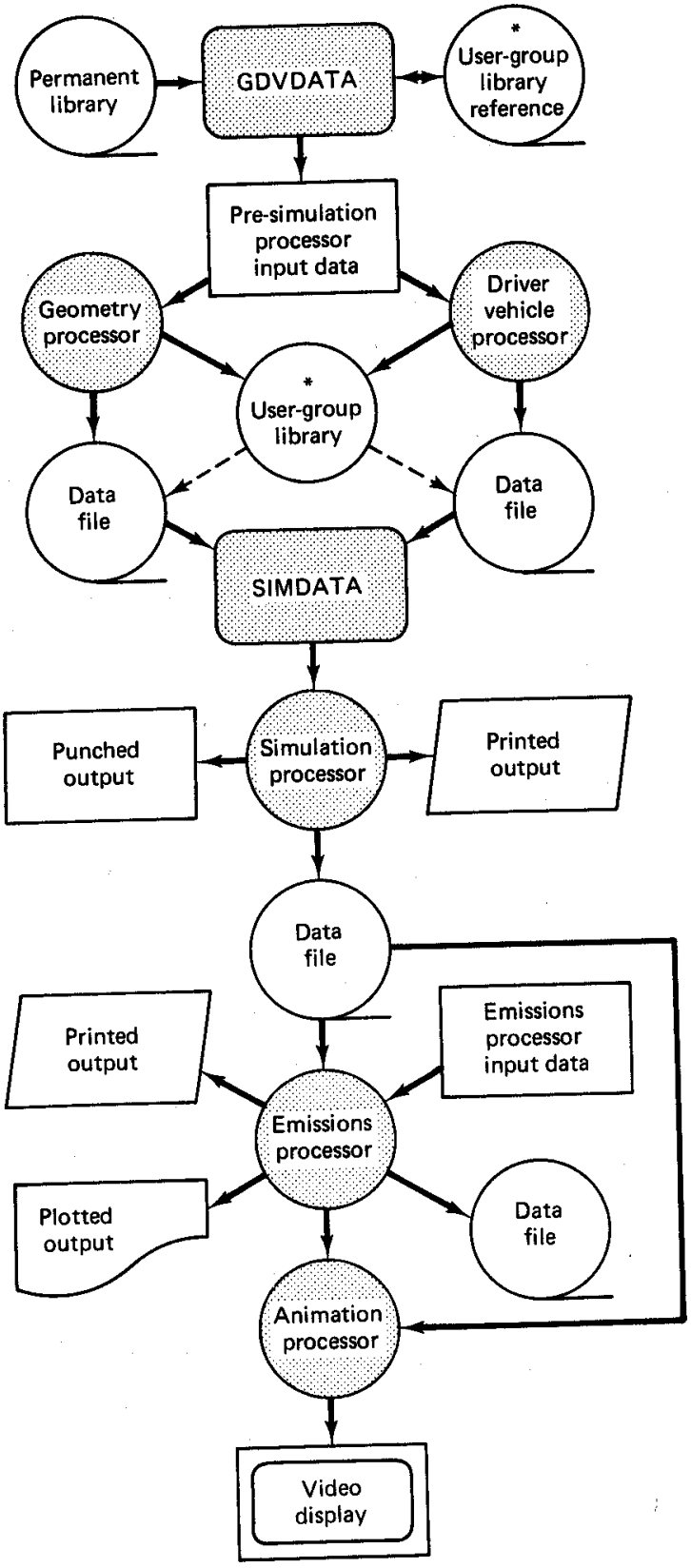
QUELQUES MODELES DE SIMULATION

1 Les intersections

Des modèles de simulation microscopiques et pseudo-macroscopiques existent pour des intersections isolées.
Les modèles microscopiques incluent les versions de NETSIM, SIGSIM et TEXAS.
Les modèles macroscopiques sont considérés comme des modèles pseudo-analytiques parce qu'ils ont les attributs de modèle de simulation et de modèles analytiques. On a entre autres CALSIG, CAPCAL, CAPSSI, POSIT, SIDRA, SIGNAL-85, SOAP-84.

1.1 TEXAS

Le modèle TEXAS (développé à l'Université du Texas à partir de la moitié des années 1970) est un modèle de simulation microscopique, stochastique et à balayage dans le temps conçu pour prévoir la performance des intersections comme fonction du design, de la demande et du contrôle d'une intersection existante ou proposée.
Les résultats fournissent les retards, le pourcentage de véhicules arrêtés, le temps de parcours et la longueur de la queue pour chaque approche de l'intersection.
Les options de design de l'intersection sont nombreuses.

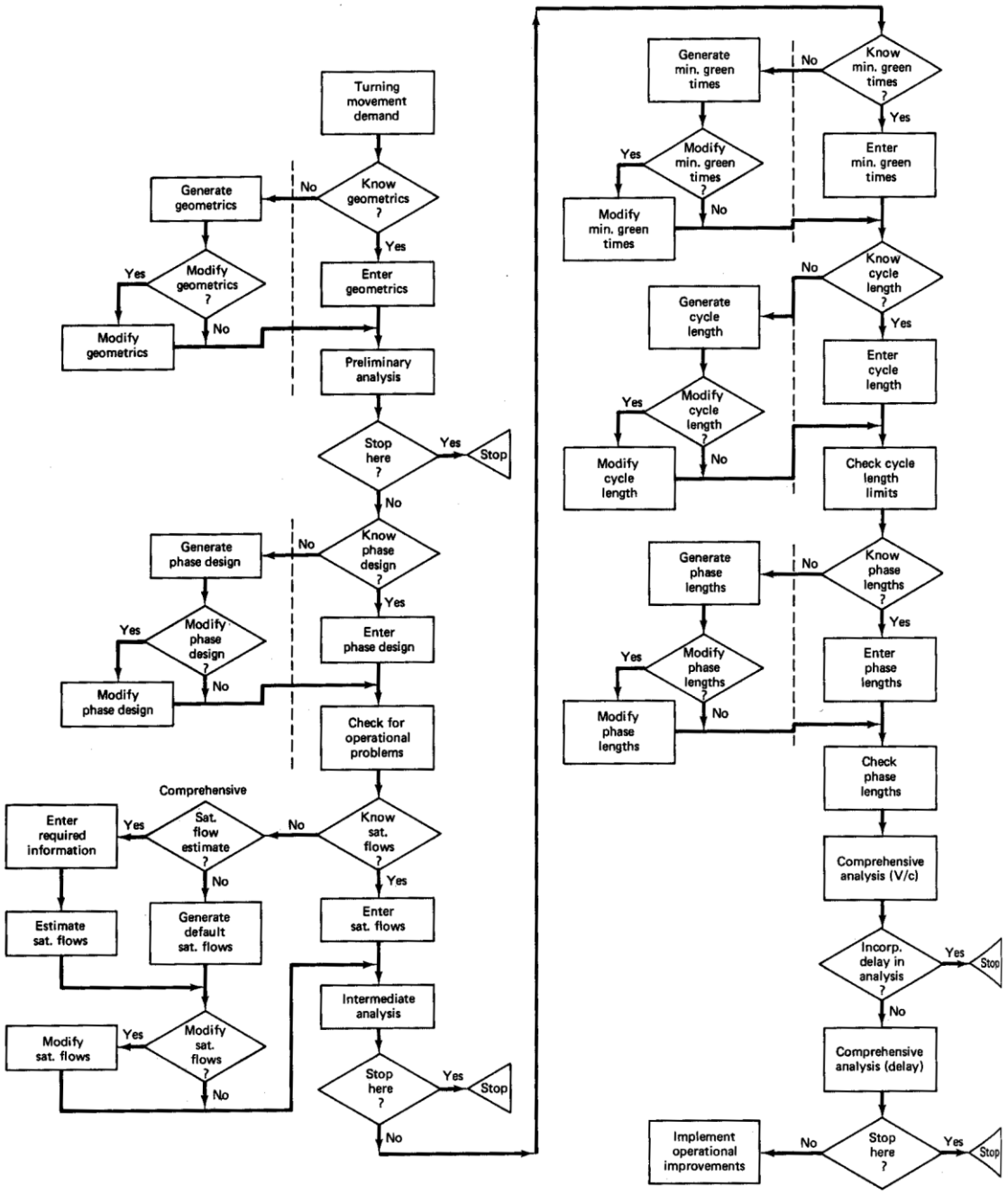

Permanent library
GDVDATA
* User-group library reference
Pre-simulation processor input data
Geometry processor
Driver vehicle processor
* User-group library
Data file
Data file
SIMDATA
Punched output
Simulation processor
Printed output
Data file
Printed output
Emissions processor input data
Emissions processor
Plotted output
Data file
Animation processor
Video display

Système de traitement de l'information géométrique : calcule la trajectoire géométrique du véhicule sur l'approche et dans l'intersection, identifie les points de conflits entre les trajectoires des véhicules et détermine la distance de visibilité minimale pour chaque autre entrée.
Système de traitement de l'information véhicule-conducteur : caractérise le flot de véhicules à simuler en générant le temps d'attente et d'autres indicateurs aléatoires pour caractériser individuellement chaque unité véhicule-conducteur.
Système de traitement de l'information de la simulation du trafic : introduit chaque unité véhicule-conducteur dans l'intersection et rassemble un grand nombre d'indicateurs de performance.

Ce programme a été écrit en FORTRAN IV.

1.2 CALSIG

Le modèle CALSIG (développé à l'Université Berkeley en Californie dans le milieu des années 1980) est un modèle de simulation macroscopique, déterministe conçu pour prévoir la performance d'une intersection en fonction du design, de la demande et du contrôle d'une intersection existante ou proposée.
Les résultats fournissent les retards, le pourcentage de véhicules arrêtés, le temps de parcours, le ratio demande capacité, l'état de la file d'attente pour chaque groupe de voies, chaque approche et pour toute l'intersection.
Il est possible de configurer la géométrie des voies du carrefour, les mouvements pour tourner et la classification des véhicules doivent être spécifiés…
Une caractéristique majeure de ce modèle est qu'il peut être utilisé pour réaliser jusqu'à 4 niveaux d'analyses : l'analyse de planification, l'analyse intermédiaire, l'analyse volume-capacité et l'analyse de l'opération.



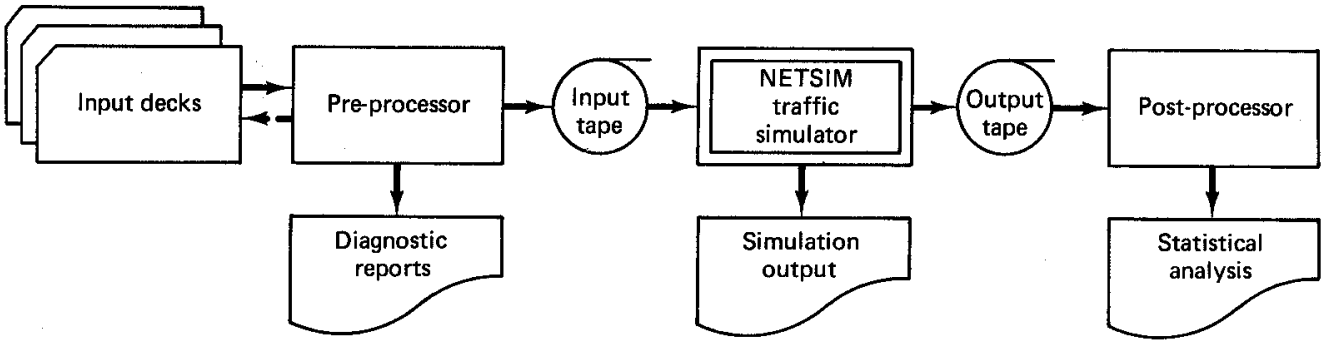
Ce programme a été écrit en Turbo-Pascal.

2 Les réseaux

Le modèle NETSIM est le seul modèle microscopique pour les réseaux. De nombreux modèles macroscopiques existent : MAXBAND, PASSER II, PASSER III, SIGOP III, SPAN, SSTOP et TRANSYT.

2.1 NETSIM

Ce modèle a été créé pour évaluer le contrôle de réseaux alternatifs et des stratégies de gestion du trafic. Le réseau est fait de nœuds et de liens et les caractéristiques de chaque lien doivent être définies.

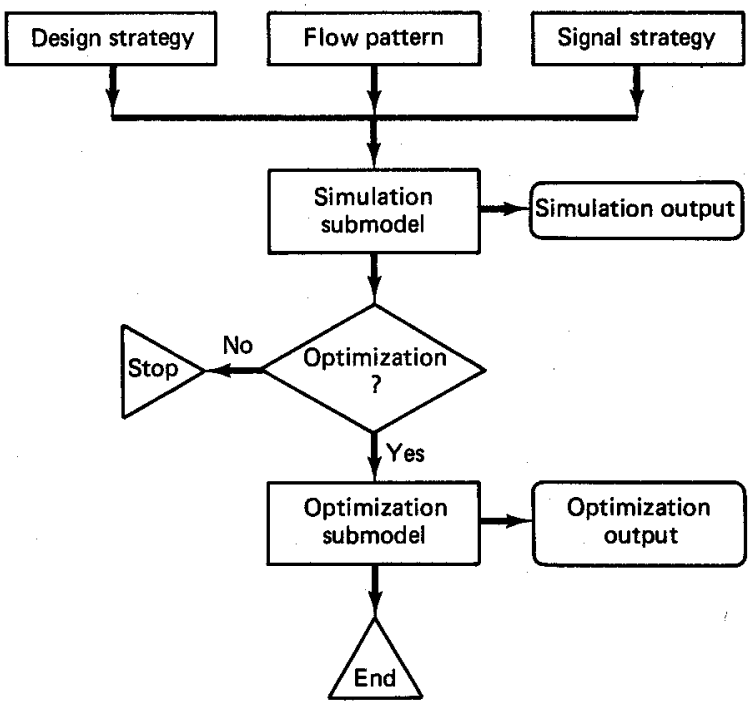


Le préprocesseur prépare l'entrée des données dans la procédure.
Le simulateur contient le programme principal.
Le post processeur manipule les données des simulations pour les comparer aux données des simulations précédentes.
Le programme fournit des indicateurs de performance du réseau comme le temps de parcours, le nombre d'arrêts, les retards, la consommation d'essence…

Ce programme a été écrit en FORTRAN.

2.2 TRANSYT

Ce modèle est un modèle macroscopique, déterministe. Il permet de calculer la performance du réseau pour un phasage de feu spécifique. La procédure d'optimisation permet de déterminer le phasage des feux le plus près de l'optimum.



Ce modèle fournit des indicateurs de performance pour chaque lien, des calculs de temps de parcours, d'arrêts, de retards, de longueurs de file d'attente et de consommation d'essence…

Le programme a été écrit en FORTRAN.

2.3 AIMSUN

Ce modèle est microscopique. Il a pour but de simuler des réseaux urbains et interurbains. Il permet de simuler et de faire des animations ainsi que de réaliser des graphiques. Néanmoins, son usage n'est pas très répandu aux Etats-Unis.

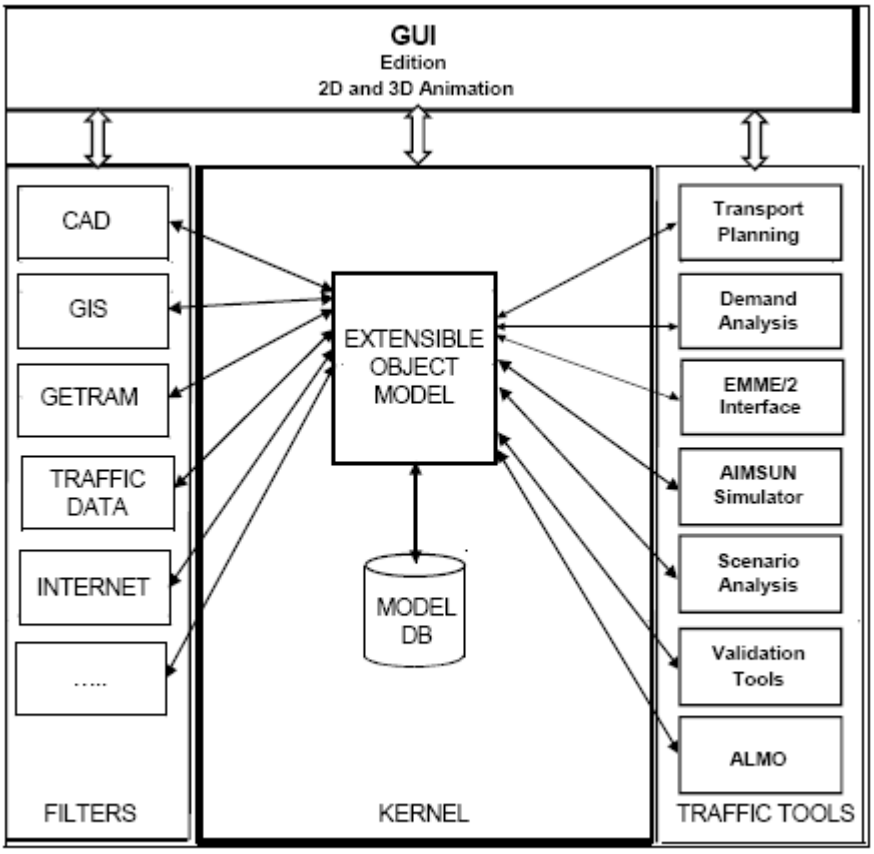


Figure 1 Conceptual Architecture of AIMSUN NG

Kernel : modèle extensible qui peut être adapté à de nombreuses applications de transport
Filtres : accès à la plupart des sources de données
Instruments de trafic : logiciels pour conduire le projet du début à la fin
GUI : interface graphique pour créer un environnement sympathique pour l'utilisateur

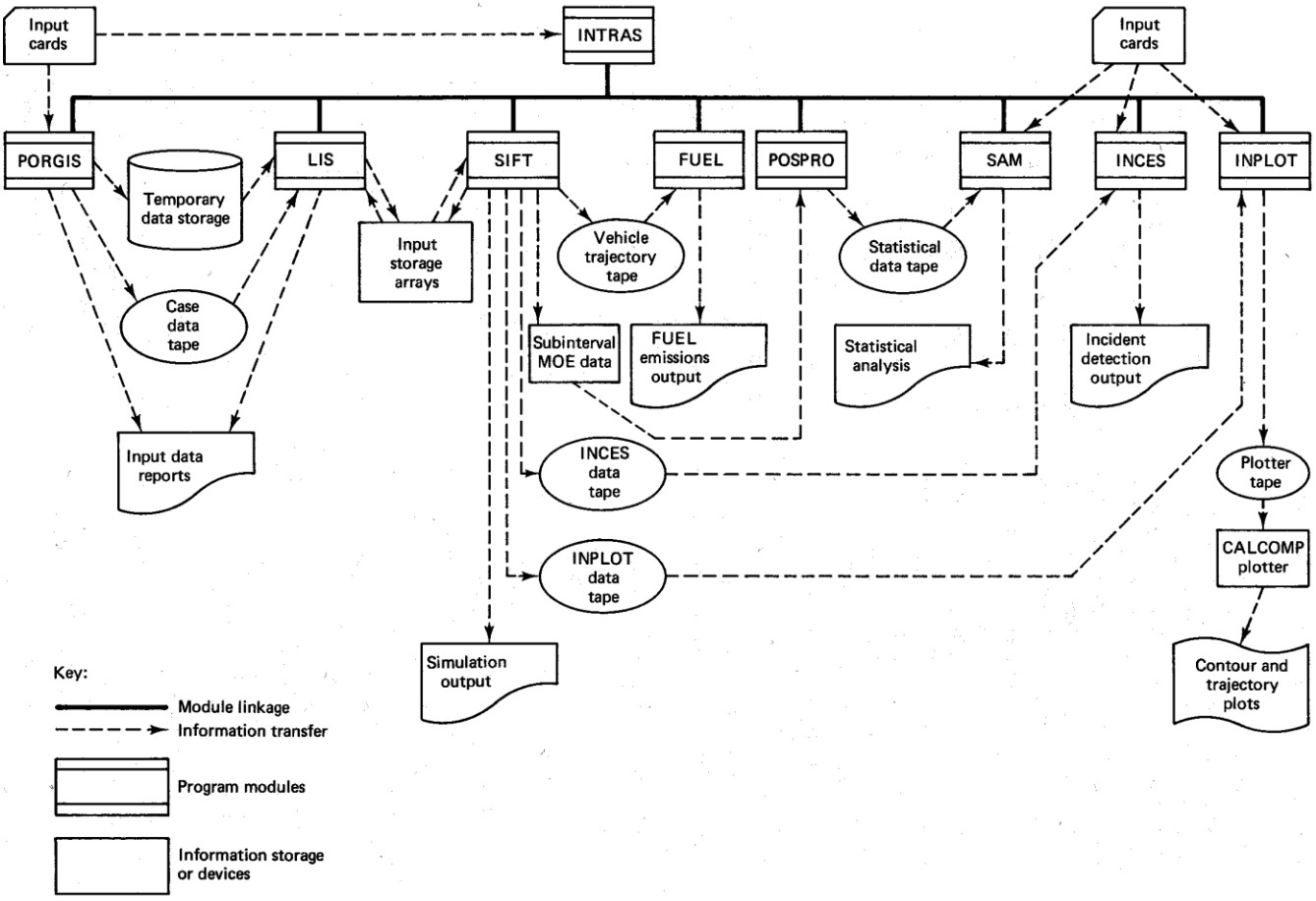
3 Les couloirs d'autoroute

Le modèle INTRAS est le seul modèle microscopique disponible pour les couloirs d'autoroute. Les modèles macroscopiques disponibles sont CORQ, FREQ, FRECON2 et KRONOS.

3.1 INTRAS

Ce modèle a été développé à la fin des années 70 et des améliorations ont ensuite été aoutées dans les années 80. C'est un modèle de simulation microscopique, stochastique conçu pour prévoir les performances de la circulation du trafic pour une autoroute selon le design, la demande et le contrôle choisi par l'utilisateur. En plus de fournir des indicateurs de performance tels que les vitesses, les distances, les temps de parcours et la consommation d'essence, on peut

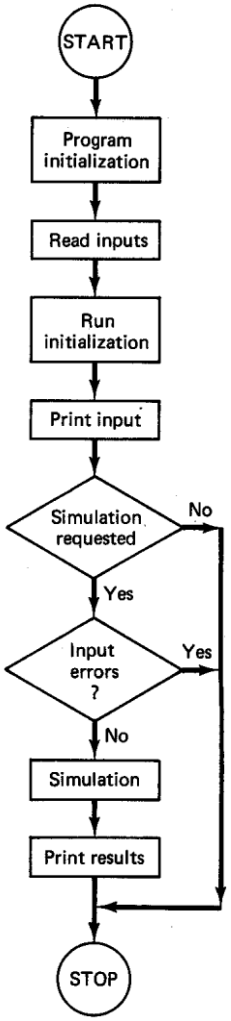
obtenir de nombreux graphiques comme des graphiques de contour de densité ou des diagrammes distance-temps.



Le module principal est INTRAS. C'est lui qui appelle les autres modules :
PORGIS : examine les données d'entrée et détecte les erreurs sur ces données.
LIS : charge les données de la simulation en boucles de données.
SIFT : réalise les simulations
FUEL : fournit des évaluations sur la consommation d'essence et les émissions.
POSPRO : créé des fichiers de statistiques de simulation pour le module SAM.
SAM : réalise des comparaisons entre des paires de simulation en cours ou une simulation en cours et des fichiers de données.
INCES : réalise toutes les procédures de détection de données et génère des données pour détecter les incidents.
INPLOT : prépare la trajectoire du véhicule.

Ce programme a été écrit en ANSI FORTRAN.

3.2 FRECON2



C'est un modèle de simulation macroscopique qui permet de simuler les performances d'une autoroute pour des conditions normales ou en cas d'incident. Les mesures de performance incluent les temps de parcours, les caractéristiques des files d'attente, les retards, la consommation d'essence et les émissions. Les données d'entrée requises incluent la géométrie de la section qui influence la capacité et des informations sur l'origine et la destination.

Le bloc d'initialisation fixe les valeurs par défaut et initialise les variables. Le programme lit ensuite toutes les entrées. Puis une initialisation a lieu suivie d'un bloc qui imprime toutes les entrées du modèle sur le fichier de sortie. On vérifie ensuite si l'utilisateur a demandé une simulation. En effet, il peut être utile de ne pas demander de simulation pour vérifier une nouvelle entrée de donnée.
De plus, si une erreur existe dans les données d'entrée, la simulation n'a pas lieu. Si la simulation est réalisée, le bloc de simulation se réalise. Les résultats sont ensuite imprimés.
Ce programme a été écrit en FORTRAN IV.

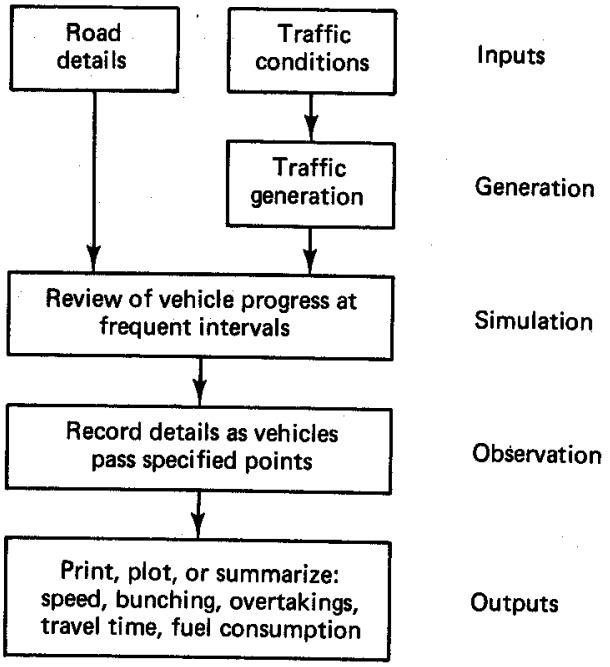
4 Les autoroutes rurales

Les modèles microscopiques sont TWOPAS, TRARR et VTI. Le seul modèle macroscopique est le modèle RURAL.

4.1 TRARR

Ce modèle a été développé en Australie dans les années 70. Il est microscopique, stochastique et prévu pour donner des indicateurs de performance d'une autoroute rurale deux voies deux sens en fonction de la géométrie et de la demande. Les indicateurs de performance incluent la distribution

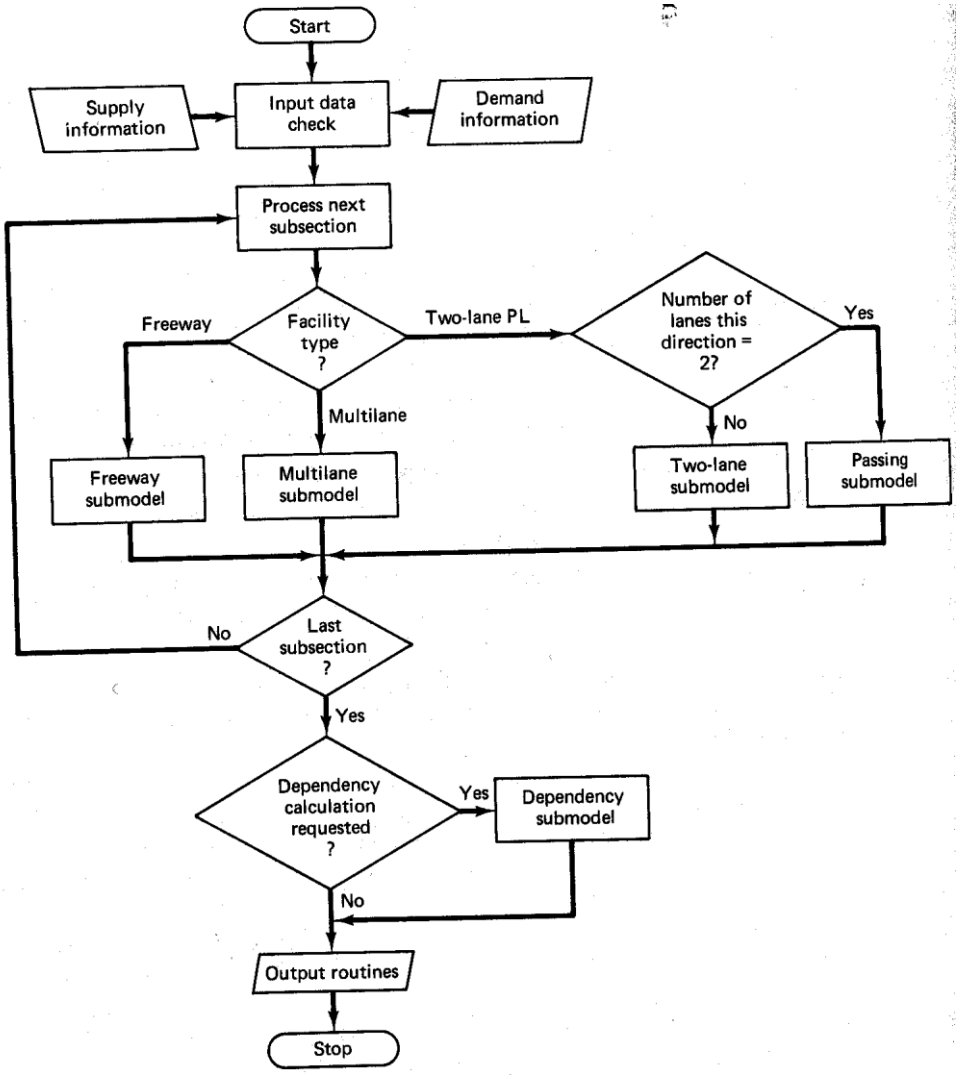
des vitesses, des pelotons et des dépassements, des informations détaillées sur les files de véhicule, des fichiers permettant ensuite de reconstituer les positions des véhicules selon les trajectoires dans le temps.



Le trafic est généré selon les techniques Monte Carlo.
Le modèle contient 5 sous-routines appelée à chaque intervalle de temps (généralement 1 seconde) :
MANVR : détermine l'état de chaque véhicule et considère les possibilités de changement d'état selon les véhicules qui sont autour de lui.
POSIT : met à jour les vitesses et positions des véhicules.
ENDS : génère les arrivées de nouveaux véhicules et supprime les véhicules qui quittent le système.
RECORD : maintient la liste de la position relative des véhicules dans chaque voie.
LVOPP : maintient la liste des prochains véhicules du côté opposé à être rencontrés.

4.2 RURAL

Ce modèle est macroscopique et déterministe permet de simuler des flots de circulation dans deux sens le long d'une autoroute rurale. Les indicateurs de performance incluent les vitesses moyennes et les profils de vitesse, le temps de parcours, les distances parcourues, les retards et les niveaux de service. Il est possible de choisir entre 5 types d'autoroute rurale : autoroute, voies multiples séparées ou non, deux voies et sections avec voie de dépassement. Il faut également choisir le type de véhicule (récréatif, camion…).



Ce modèle a été écrit en FORTRAN IV.

5 Les opérations sous contraintes

5.1 VISSIM

Ce modèle microscopique est particulièrement efficace pour analyser le trafic sous contraintes comme les opérations d'entrées et de sorties sur les autoroutes, les carrefours avec ou sans feux… Il est possible d'avoir des sorties en trois dimensions.

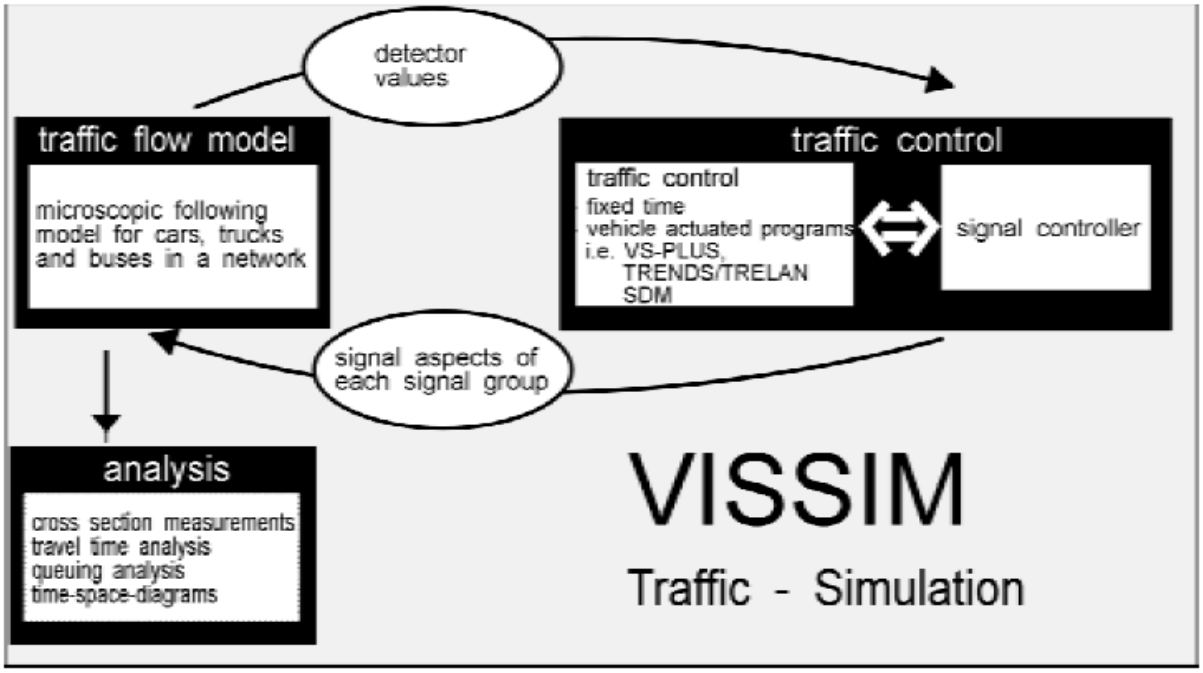


Figure 6. Flow Chart of VISSIM Traffic Simulation