

Projet :

Gestion d'énergie d'un véhicule à hydrogène

V2 du 7/12/19 : rajout de la section III, pages 6 à 9

I. Problématique :

Les véhicules électriques se répandent mais sont pénalisés par une autonomie limitée, associée à des durées de recharge largement supérieures au temps de remplissage d'un réservoir d'essence. Une réponse technique possible est l'utilisation de d'une pile à combustible (PàC), qui génèrent de la puissance électrique à partir d'hydrogène en réservoir et de l'oxygène de l'air. En l'état actuel des choses, les principaux progrès à réaliser pour rendre l'utilisation de l'hydrogène concurrentielle concernent l'augmentation de la durée de vie et la réduction du coût des piles à combustible. Par ailleurs, il faut aussi développer des infrastructures de production et de distribution d'H₂, avec le souci d'une production décarbonnée.

Intéressons-nous maintenant à l'objet technique. En pratique, la pile à combustible doit être associée à un composant de stockage (batterie ou supercondensateur) pour trois raisons : i) une pile à combustible a une inertie trop grand pour suivre les variations temporelles des appels de puissance du véhicule ; ii) le rendement de la pile à combustible dépend de son point de fonctionnement, et on a intérêt à la faire travailler dans sa zone de bon rendement ; iii) une source d'économie d'énergie non négligeable est la récupération d'énergie au freinage.

On parle donc de générateur hybride pile à combustible / stockage. La Figure 1, extraite de [1], montre le principe d'un tel système. Le véhicule considéré ici est un scooter urbain avec une association pile à combustible / supercondensateur, mais le principe reste le même pour tout autre type de véhicule (voiture, camion, train...) et pour un système pile à combustible / batterie. Le moteur électrique (non représenté) est alimenté par un bus DC, sur lequel sont connectés en parallèle la pile à combustible et le composant de stockage. Des convertisseurs DC/DC sont nécessaires afin d'adapter les niveaux de tension entre le bus DC et les composants. La pile à combustible est alimentée par l'H₂ stockée dans un réservoir embarqué. Le composant de stockage joue le rôle de tampon d'énergie entre la puissance appelée par le scooter et la puissance fournie par la pile. Il n'est pas rechargeable de l'extérieur, et l'énergie nécessaire au déplacement du scooter est fournie par l'hydrogène.

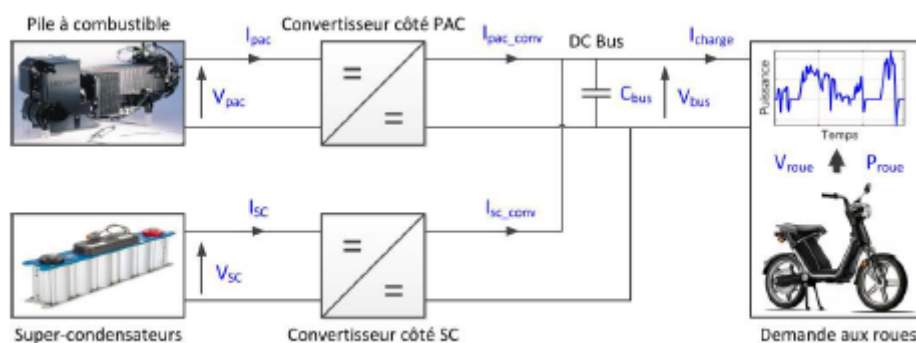


Figure 1 : Schéma de principe d'un générateur hybride pile à combustible / supercondensateur(extrait de [1])

Examinons de plus près la logique de fonctionnement de l'hybridation. A un instant donné, supposons que la puissance de traction est très faible. A faible puissance, le rendement de conversion de la pile à combustible est faible. Il peut alors être préférable d'utiliser la pile à plus forte puissance et de stocker le surplus pour une utilisation ultérieure. Il est également envisageable de ne pas utiliser la pile mais l'énergie stockée. Le choix dépend du niveau de stockage.

On le voit donc, à chaque instant, la puissance appelée par le conducteur peut être fournie par la pile à combustible, par le stockage ou par les deux conjointement. Par ailleurs, le stockage est réversible et peut être rechargé par récupération d'énergie au freinage ou par la pile à combustible.

La problématique de gestion de l'énergie dans ce type de système est de répartir au mieux la puissance de traction entre la pile à combustible et le stockage. Ces décisions nécessitent de considérer l'ensemble du trajet, car la pertinence d'une décision dépend en général de l'avenir. Par exemple, récupérer de l'énergie au freinage nécessite que le stockage ne soit pas plein au moment du freinage.

Le problème d'optimisation est donc posé en termes de minimisation de la consommation d'H₂ sur la totalité d'un trajet donné.

Le but du projet d'optimisation qui vous est proposé est d'étudier un scooter à hydrogène et sa gestion d'énergie. Les étapes du projet seront les suivantes :

1. Compréhension et mise en place du modèle du système
2. Etude et implémentation d'une méthode de minimisation de la consommation sur un trajet donné
3. Etude de l'influence de la capacité de la batterie sur les performances du système (compromis coût batterie / gain en consommation H₂).

Toutes les données du projet sont extraites de [1], mais le stockage par supercapacité est remplacé par un stockage batterie. Les principes mis en œuvre sont strictement identiques, mais les équations à traiter sont plus simples pour un stockage batterie.

II. Étape 1 : modélisation du système

II.1. Vue d'ensemble du modèle

La consommation des véhicules est évaluée sur banc de mesure, sur des trajets définis par des cycles de vitesse de référence ¹. La Figure 2 montre un exemple de cycle que nous allons utiliser dans ce projet : le terme « cycle de vitesse » fait référence à un profil de vitesse au cours du temps $v_{scooter}(t)$, où $v_{scooter}$ représente la vitesse du scooter.

¹ Ces cycles ne sont que très moyennement représentatifs des usages réels des véhicules, d'où les écarts entre les consommations affichées dans les documentations commerciales et les consommations réelles constatées par les usagers.

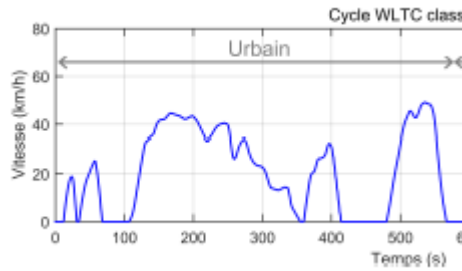


Figure 2 : cycle de vitesse WLTC pour scooter – milieu urbain

Le modèle du système doit nous permettre de calculer la consommation en H2 sur ce cycle. Pour cela, les étapes sont les suivantes :

- Utilisation du principe fondamental de la dynamique pour calculer le profil de puissance mécanique correspondant au profil de vitesse, compte tenu des différentes forces s'exerçant sur le véhicule : résistance au roulement, résistance aérodynamique, inertie
- Utilisation d'un modèle de moteur électrique pour déterminer la puissance électrique nécessaire
- Choix d'une répartition de la puissance électrique entre la pile à combustible et la batterie (gestion d'énergie)
- Utilisation d'un modèle de convertisseur et d'un modèle de la pile à combustible pour déterminer le débit d'H2 nécessaire à l'alimentation de la pile
- Utilisation d'un modèle de convertisseur et d'un modèle de batterie pour déterminer l'évolution de son état de charge au cours du trajet

La Figure 3 montre le schéma d'ensemble du système et le sens des flux de données dans le modèle. Les modèles des différents composants sont ensuite présentés.

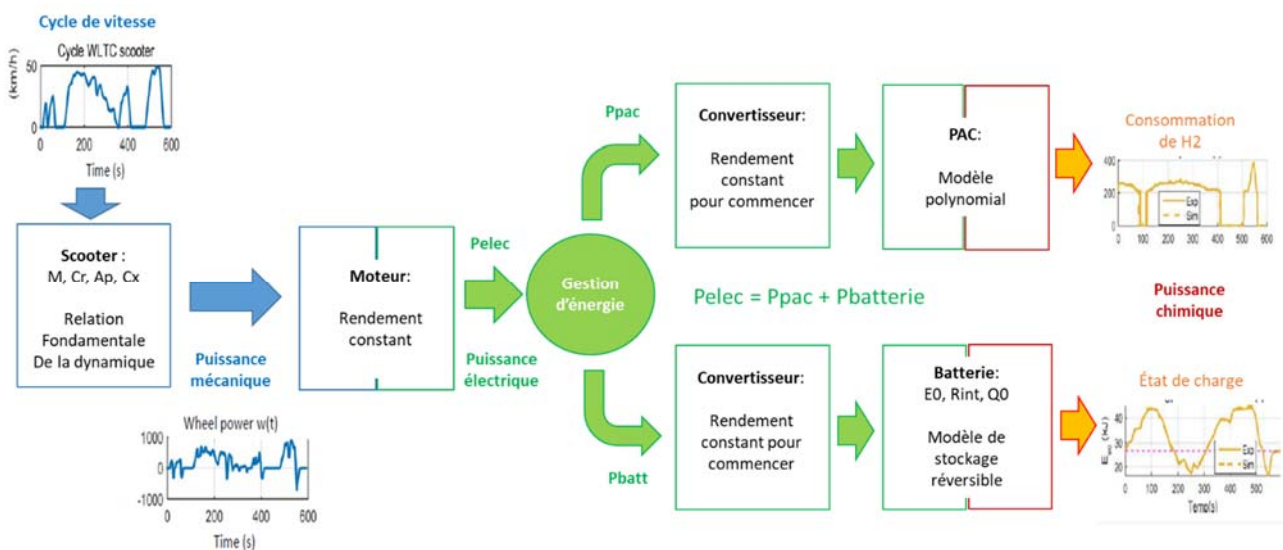


Figure 3 : schéma de principe du modèle du système étudié

II2. Dynamique du scooter :

Le profil de puissance mécanique $P_{méca}(t)$ que la machine électrique doit fournir pour réaliser le cycle de vitesse a pour expression :

$$P_{méca}(t) = F_{traction}(t) \cdot v_{scooter}(t)$$

où $F_{traction}(t)$ est la somme des forces s'exerçant sur le véhicule :

$$F_{traction}(t) = F_{roulement} + F_{aérodynamique}(t) + F_{inertie}(t).$$

Les différentes forces sont :

- $F_{roulement} = C_r \cdot M \cdot g$ Résistance au roulement (écrasement des pneus pour assurer l'adhérence)
- $F_{aérodynamique}(t) = \frac{1}{2} \rho \cdot A_p \cdot C_d \cdot [v_{scooter}(t)]^2$ Résistance aérodynamique
- $F_{inertie}(t) = M \cdot \frac{v_{scooter}}{dt}(t)$ Inertie (positive si accélération, négative si décélération)

Les différents symboles, leurs significations et leurs valeurs sont répertoriés ci-dessous.

Symbole	Signification	Valeur
M	Masse	110 kg
A_p	Aire frontale	0,7 m ²
C_d	Coefficient de traînée	0,75
C_r	Coefficient de roulement	0,01
ρ	Masse volumique de l'air	1.28 kg/m ³

II3. Machine électrique :

Dans un premier temps, la machine électrique sera modélisée par un rendement constant égal à 0,8.

II4. Pile à combustible :

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est similaire à celui d'une batterie : il s'agit d'une réaction d'oxydoréduction, mais les éléments chimiques qui réagissent sont H₂ et O₂ et la réaction n'est pas réversible. Le stockage en H₂ est extérieur à la pile, dans un réservoir haute pression (700 bars) embarqué. L'O₂ provient directement de l'air ambiant.

A l'anode : $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ A la cathode : $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

Bilan : $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{électricité} + \text{chaleur}$

La pile à combustible est modélisée par deux informations :

- a. Puissance chimique et consommation en hydrogène en fonction de la puissance électrique débitée :

$$P_{chimique} = c_0 + c_1 P_{pac} + c_2 P_{pac}^2 + c_3 P_{pac}^3 + c_4 P_{pac}^4$$

c₀	c₁	c₂	c₃	c₄
64.4228	2.4096	-0.0019	5.5008e-6	-2.4602e-9

Le débit massique d'H₂ est lié à la puissance chimique par la relation :

$$\frac{dm_{H_2}}{dt}(t) = \frac{M_{H_2}}{PCS} P_{chimique}(t)$$

où $PCS = 283 \text{ kJ/mol}$ et $M_{H_2} = 2,016 \text{ g/mol}$ sont respectivement le pouvoir calorifique supérieur de l' H_2 et sa masse molaire.

b. Tension aux bornes de la pile en fonction de la puissance électrique débitée :

$$v_{PAC} = \begin{cases} a_1 P_{pac} + b_1 & \text{si } 0 \leq P_{pac} \leq P_{lim} \\ a_2 P_{pac} + b_2 & \text{si } P_{pac} > P_{lim} \end{cases}$$

P_{lim}	a_1	b_1	a_2	b_2
100	-0.0528	40.7721	-0.0175	37.5178

Ces modèles ont été établis à partir de mesures sur une pile en laboratoire.

II5. Batterie :

Pour la batterie, nous utilisons la convention récepteur : $i_{batt} > 0$ pour un courant de décharge

La batterie est modélisée par un modèle statique, avec une fem E_{batt} en série avec une résistance interne R_{int} :

$$v_{batt}(t) = E_{batt} - R_{int} \cdot i_{batt}(t)$$

Par ailleurs, la charge stockée dans la batterie est obtenue en intégrant le courant : $Q(t) = Q(0) - \int_0^t i_{batt}(\tau) \cdot d\tau$

On travaille avec l'état de charge défini par $SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_0} \times 100$, où Q_0 est la capacité de la batterie, généralement exprimée en $[A \cdot h]$.

$$E_{batt} = 12 \text{ V} \quad R_{int} = 2 \text{ m}\Omega \quad Q_0 = 20 \text{ A} \cdot h$$

II6. Convertisseurs :

Dans un premier temps, les convertisseurs sont modélisés par des rendements constants égaux à 0.95.

II7. Gestionnaire d'énergie :

Pour la mise en place du modèle, vous allez considérer deux situations : i) toute l'énergie est fournie par la batterie (PAC inactive) – ii) toute l'énergie est fournie pas la PAC – iii) la puissance est partagée à 50% entre la PAC et la batterie.

III. Étape 2 : Minimisation de la consommation par algorithme de Pontryaguine

III1. Description du problème d'optimisation :

Le problème d'optimisation consiste à commander la pile à combustible de façon à minimiser la consommation en hydrogène sur un cycle de vitesse parfaitement connu à l'avance, tout en assurant un « bilan batterie nul », c'est-à-dire un état de charge de la batterie identique à l'arrivée et au départ. Le critère d'optimisation est la masse d'hydrogène consommée par la pile à combustible sur l'ensemble du trajet ; la variable de décision est la commande de la pile à combustible ; le bilan batterie nul se traduit par la contrainte d'extrémité : $SOC(t_f) = SOC(t_0)$.

À chaque instant t , le cycle de vitesse à réaliser nécessite qu'on fournisse au moteur une certaine puissance électrique $P_{elec}(t)$. Cette puissance est fournie conjointement par la pile à combustible et par la batterie, c'est-à-dire que $P_{elec}(t) = P_{pac}(t) + P_{batterie}(t)$. En commandant la puissance délivrée par la pile à combustible, on impose de fait la puissance batterie. Si on choisit une commande telle que $P_{pac}(t) < P_{elec}(t)$, alors $P_{batterie}(t) > 0$: dans cette situation, la pile à combustible fournit une puissance inférieure à la puissance nécessaire à la traction et le complément est fourni par la batterie. A l'inverse, si on choisit une commande telle que $P_{pac}(t) > P_{elec}(t)$, alors $P_{batterie}(t) < 0$: dans cette situation, la pile à combustible fournit une puissance supérieure à la puissance nécessaire à la traction et l'excès est stocké par la batterie. Un bilan batterie nul correspond à une alternance de situations de charge et de décharge de la batterie. Notre problème d'optimisation consiste à déterminer le profil de puissance fourni par la pile à combustible qui minimise la consommation d'hydrogène, tout en assurant un bilan batterie nul. Le choix de la puissance fournie par la pile à combustible est fait à chaque pas de temps ; cela signifie qu'il y a autant de variables de décision que de pas de temps dans la simulation. Le profil de puissance électrique à fournir au moteur est entièrement déterminé par le profil de vitesse. Le fait de commander le profil de puissance de la pile à combustible impose donc le profil de puissance de la batterie, et par conséquent le profil de courant de la batterie et le profil d'état de charge par intégration du courant.

La Figure 4 schématise le système sous forme d'une « boîte noire » et met en évidence les variables importantes du point de vue de l'optimisation : la puissance électrique à fournir au moteur, la commande de la pile à combustible, le débit d'hydrogène associé et l'état de charge de la batterie.

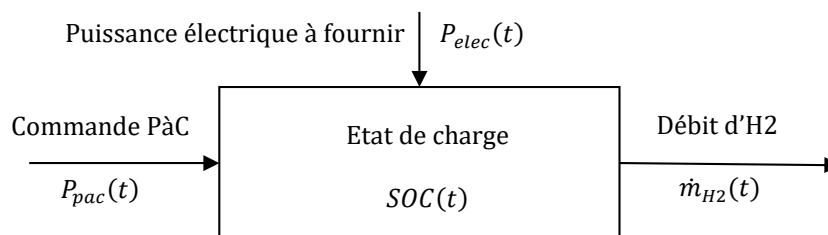


Figure 4 : Schéma de principe du système étudié

III2. Formulation du problème d'optimisation :

Le problème que nous souhaitons traiter est un problème de commande optimale et des méthodes mathématiques existent pour résoudre ce type de problème. Avant de présenter la méthode mise en œuvre dans ce projet, nous

allons commencer par introduire les notations habituellement utilisées dans ce domaine et la manière dont le problème est formulé mathématiquement.

Le système étudié est un système dynamique, qui évolue au cours du temps en fonction des sollicitations extérieures et de la manière dont ses composants sont commandés. Dans le vocabulaire métier, on distingue de manière classique:

- la variable de commande, notée u ,
- les sollicitations extérieures, aussi appelées perturbations, représentées par la variable w ,
- la variable d'état du système, notée x .

Dans notre étude :

- la commande est la puissance électrique délivrée par la pile à combustible : $u = P_{pac}$
- la perturbation est la puissance électrique à fournir au moteur : $w = P_{elec}$,
- la variable d'état est l'état de charge de la batterie : $x = SOC$

L'état de charge de la batterie est relié à la puissance demandée par les roues et à la puissance fournie par la pile par une équation d'évolution de la forme :

$$\frac{dx}{dt}(t) = \dot{x}(t) = f(u(t), w(t))$$

Cette équation d'évolution est à établir à partir du modèle de la batterie.

Pour un profil de commande donné l'ensemble du trajet, le coût à minimiser est la quantité d'hydrogène consommé. Ce coût s'obtient en intégrant le débit massique d'H₂ \dot{m}_{H_2} sur la totalité du trajet :

$$J_{H_2}(u) = \int_{t_0}^{t_f} \dot{m}_{H_2}(u(t)) \cdot dt.$$

L'étude est faite à bilan batterie nul, c'est-à-dire que l'état final doit être le même que l'état initial. Toute l'énergie transmise aux roues est fournie par l'hydrogène. La batterie n'a qu'un rôle de stockage/déstockage temporaire de l'énergie qui permet d'optimiser la consommation de la pile à combustible. Cela se traduit par une contrainte dite « d'extrémité » :

$$x(t_f) = x(t_0)$$

Notons enfin que les différents composants ont des zones de fonctionnement admissibles, ce qui se traduit par des contraintes dites « d'intervalle » sur la puissance fournie par la pile à combustible, sur le courant fourni par la batterie, ou sur l'état de charge de celle-ci.

Le problème d'optimisation s'écrit donc finalement :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{u \in U} J_{H_2}(u) = \int_{t_0}^{t_f} \dot{m}_{H_2}(u(t)) \cdot dt \\ \dot{x}(t) = f(u(t), w(t)) \\ u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max} \\ \dot{x}_{\min} \leq \dot{x}(t) \leq \dot{x}_{\max} \\ x_{\min} \leq x(t) \leq x_{\max} \\ x(t_0) = x(t_f) \end{array} \right. . \quad (\text{PO})$$

III3. Expression du principe du minimum de Pontryaguine :

Dans le cas où on ne prend pas en compte les contraintes de bord sur la variable d'état, le problème peut être traité facilement en appliquant le principe du maximum de Pontryaguine.

Le principe du minimum de Pontryaguine permet de remplacer la minimisation de la consommation globale J_{H_2} par la minimisation à chaque instant d'une consommation « équivalente » qui prend en compte à la fois la consommation de la pile, mais aussi un coût d'utilisation de la batterie. Cette notion intuitive se démontre rigoureusement dans le cadre de la théorie des variations, qui généralise la notion de dérivée à la situation où la variable n'est pas un nombre, mais une fonction ([2], page 234 et suivantes) ! Dans le cadre de ce projet, nous nous satisferons de l'énoncé du principe, sans remonter à ses fondements mathématiques.

On introduit λ , l'état adjoint associé à la contrainte $\dot{x}(t) = f(u(t), w(t))$ et la fonction dite « Hamiltonien » définie par :

$$\mathcal{H}(\lambda, u(t)) \stackrel{\text{def}}{=} \dot{m}_{H_2}(u(t)) + \lambda \cdot f(u(t), w(t)).$$

Le principe du minimum de Pontryaguine stipule que si u^* est une solution optimale de (PO), alors il existe un état adjoint λ^* tel que :

- $\forall t, \quad \mathcal{H}(\lambda^*, u^*(t)) \leq \mathcal{H}(\lambda^*, u(t))$
- La contrainte d'extrémité est respectée : $x(t_f) = x(t_0)$

L'opérateur adjoint λ représente le coût équivalent en hydrogène de l'utilisation de la batterie. En effet, la batterie est chargée par la pile à combustible, donc utiliser la batterie correspond à une utilisation différée de la pile.

Une faible valeur de λ favorise l'usage de la batterie et tend à vider celle-ci. A l'inverse, une valeur élevée privilégie le stockage d'énergie dans la batterie et conduit à son remplissage. Le principe du minimum de Pontryaguine consiste à trouver une valeur intermédiaire, correspondant à un usage tampon de la batterie, caractérisé par un bilan batterie nul.

Supposons que $\lambda = 0$, c'est-à-dire que l'utilisation de la batterie est gratuite. Le hamiltonien se réduit à la consommation d' H_2 , $\mathcal{H}(0, u(t)) = \dot{m}_{H_2}(u(t))$. La commande qui minimise cette consommation est $u(t) = 0$ sur toute la durée du trajet. La puissance de traction est intégralement fournie par la batterie, et donc en fin de trajet $x(t_f) < x(t_0)$.

Supposons que $\lambda = \lambda_\infty$, une valeur « très grande », telle que $\dot{m}_{H_2}(u(t)) \ll \lambda_\infty \cdot f(u(t), w(t))$. L'utilisation de la batterie est alors extrêmement coûteuse. Dans ces conditions Le hamiltonien se réduit à $\mathcal{H}(\lambda_\infty, u(t)) \cong$

$\lambda_\infty \cdot f(u(t), w(t))$. Pour minimiser cette consommation, il faut minimiser \dot{x} , ce qui correspond à minimiser le courant batterie. Le courant batterie peut être négatif (charge de la batterie). Minimiser sa valeur algébrique consiste à maximiser le courant de charge de la batterie ! La commande qui permet cela est $u(t) = u_{max}$ sur toute la durée du trajet. La pile à combustible fournit toute la puissance de traction et recharge la batterie, donc en fin de trajet $x(t_f) > x(t_0)$.

L'objectif de l'algorithme PMP est de trouver la valeur intermédiaire λ^* telle que $x(t_f) = x(t_0)$.

En pratique, l'état de charge final est une fonction croissante de λ . Une recherche par dichotomie permet donc de déterminer la valeur optimale $\lambda^* \in [0, \lambda_\infty]$.

III4. Travail à réaliser :

- Mise en œuvre de l'algorithme de PMP, selon le principe général suivant :
 - Choix empirique d'une valeur λ_∞ telle que $x(t_f) > x(t_0)$
 - Dichotomie sur la valeur de λ :
 - À λ donné, pour chaque pas de temps :
 - Minimisation de $\mathcal{H}(\lambda, u(t))$
- Test pour $x_0 = 50\%$

Bibliographie

- [1] Q. Jiang, «Gestion énergétique de véhicules hybrides par commande optimale stochastique,» Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, 2017.
- [2] J. Culioli, « Introduction à l'optimisation », Editions Ellipses, 1994.