

**Résumé traduit du Chap. 7: The Dynamics of Solid Waste
Generation (Réf. 1).
La dynamique de génération des déchets solides.**

Introduction

Le rapport « The Limits to Growth » réalisé par l'équipe Meadows du MIT et publié en 1972 à la demande du Club de Rome a été redécouvert par les Français en 2012 suite à la traduction de l'ouvrage «The Limits to Growth : the 30-Year Update».

L'ouvrage de 1974 « Toward Global Equilibrium : Collected Papers » dont est tiré le présent chapitre complète le rapport de 1972 en explicitant certaines boucles de rétroaction.

Celle qui est synthétisée ici concerne la boucle de génération des déchets solides. Ce fléau est intéressant à modéliser, car il concerne à la fois l'amont (les ressources naturelles) et l'aval (la pollution générée). La modélisation effectuée permet de facto de comprendre comment diminuer ce problème.

Résumé

Le problème des déchets solides générés par nos sociétés industrielles est devenu majeur ce dernier siècle. La génération de déchets solides étant proportionnelle à la quantité de produits, à la fraction de produit brut définitivement perdu dans chaque produit jeté et à l'inverse de la durée de vie du produit, il n'existe que trois façons de diminuer le problème : réduire le nombre de produits en cours d'usage, réduire les pertes de matière par produit rebuté ou augmenter la durée de vie des produits.

Le modèle numérique créé par Meadows et Randers l'a été pour savoir laquelle (lesquelles) de ces trois pistes étaient la (les) meilleure, en s'appuyant sur un cas concret : celui du cuivre aux USA dans les années 70.

Le résultat est qu'une certaine durabilité est obtenue en conjuguant les politiques suivantes : taxe sur l'extraction, subvention sur le recyclage, augmentation de la durée de vie des produits, doublement (e augmentation sensible) de la fraction maximale recyclable et réduction modérée de la quantité de matériau brut dans chaque produit.

A contrario, l'application de ces mesures unitairement ne conduit pas à un résultat probant.

La difficulté est d'augmenter la fraction maximale recyclable, de réduire la quantité de matériau brut par produit tout en augmentant la durée de vie du produit.

Une proposition est faite : elle consiste à introduire une taxe sur les produits, taxe proportionnelle au ratio de déchets dans le produit divisée par la durée de vie du produit. **La durée de vie (re)deviendrait ainsi un critère fondamental**, ce qui inciterait les fabricants à utiliser tous les moyens possibles pour ce faire : depuis une meilleure conception jusque faire des produits facilement réutilisables, réparables et/ou recyclables.

La durée de vie pourrait être établie sur une base statistique par des « bureaux d'audit » indépendants, de même que pour les quantités de matériau brut, de la fraction perdue et le caractère recyclable ou non des sous-parties du produit. Ces organismes restent à inventer, mais seraient source de création d'emplois.

Le dernier enseignement du modèle est que **plus on attend** pour mettre en place ces politiques, et plus leurs **chances de succès s'amenuisent**. Car ce qui compte au premier ordre, c'est la disponibilité de la ressource première (ici le cuivre). Passé un certain stade, les politiques salutaires deviennent inefficaces à cause de la raréfaction de la ressource. Les politiques enclenchées après le début du déclin ne serviront à rien...

Chapitre 7 traduit de façon synthétique

Introduction

Tous les pays industriels ont un grave problème urgentissime : celui des **déchets solides** (*Solid Wastes*). Ce problème présente une double facette : d'une part la pression induite sur les aires de décharges (et les exutoires en général) et d'autre part celle de l'épuisement irréversible des ressources non renouvelables.

La quantité de **rebut**¹ produits annuellement a amené à une progressive prise de conscience du problème induit sur le long terme. Par exemple, la Figure 7- 1 illustre les quantités annuelles de déchets solides produits aux USA pour l'année 1967.

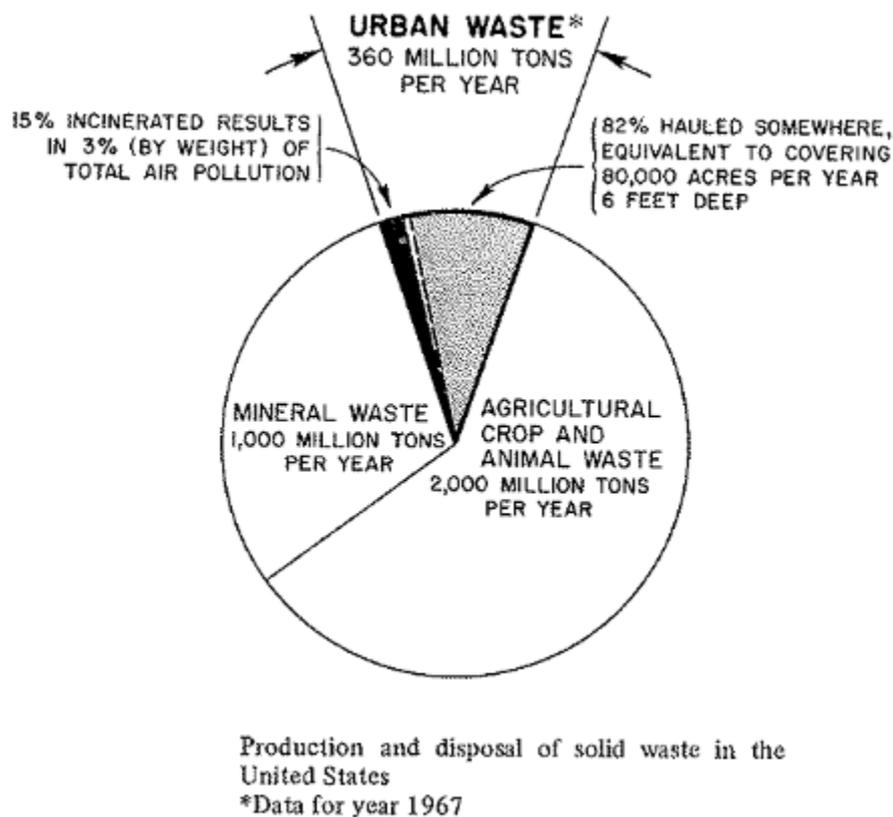


Figure 7- 1 : Quantité et flux de déchets annuels aux USA en 1967

Les solutions possibles pour le problème des déchets solides sont peu nombreuses. Il faut en effet respecter un double objectif : celui de préserver les ressources naturelles et celui de réduire le taux d'augmentation des déchets dans les décharges.

Donc, même une approche du type « utilisation de produits biodégradables » n'est pas une solution adéquate, car elle ne répond qu'à la moitié du problème : l'augmentation des décharges.

¹ **Rebut** désigne ce que l'on jette. **Déchet** désigne la quantité perdue dans l'usage d'un produit.

En principe, il n'y a qu'une seule approche valide pour ce problème : celle qui consiste à réduire la vitesse avec laquelle on prélève les ressources naturelles pour les transformer en déchets par l'intermédiaire de produits manufacturés.

Nous n'avons pas le choix : comme nous allons le voir, *ce flux doit être réduit*.

Pour parler précisément de la dynamique de la génération de *rebut*s et par suite de *déchets* (c'est-à-dire de la fraction des rebuts définitivement perdue), nous devons avoir une *approche quantitative*.

Pour ce faire, considérons la quantité ***P*** d'un produit présent à l'équilibre en cours d'usage à un instant *t* dans le système et ***L*** sa durée de vie. Le rapport

$$\lambda = \frac{P}{L} \quad \text{Eq. 1}$$

représente le flux annuel de **produit nouveau** nécessaire pour maintenir l'équilibre.

C'est aussi le flux de produit qui « sort » du système chaque année = **le rebut** (*Discarded products per unit time*).

Si l'on suppose que *w* représente la fraction de produit définitivement perdue par unité de produit rebuté, alors **le rapport** :

$$S = \frac{P \cdot w}{L} \quad \text{Eq. 2}$$

est le **taux (ou flux) de produit définitivement perdu annuellement**, c'est-à-dire le **flux annuel de déchets**.

En conséquence, il n'y a que 3 façons de réduire ce flux *S* de déchets :

- ✓ Réduire la quantité de produit *P*.
- ✓ Augmenter la durée de vie *L* du produit (ou le rendre réparable plus facilement).
- ✓ Réduire la fraction *w* de produit perdue (ou recycler le produit, ce qui revient à réduire *w*).

Remarque intermédiaire :

On notera qu'une société qui a une *production constante* λ de produit peut voir sa quantité de produit P augmenter (et donc son niveau d'équipement moyen par personne, donc potentiellement sa qualité de vie, augmenter) simplement en augmentant la durée de vie L des produits en question, puisque d'après la 1^{ère} équation, on a $P = \lambda \times L$.

Un monde « *sans croissance industrielle ou économique* » peut donc voir sa « *qualité de vie* » **augmenter** simplement en *redonnant de la valeur au temps* (en augmentant la durée de vie des choses, plutôt qu'en la diminuant).

Discutons quelques instants sur chacune des 3 alternatives proposées :

- ✓ Réduire la quantité de produit P : puisque le « standing de vie » est lié à la quantité de produit disponible et accessible par personne, réduire P est probablement non politiquement correct bien que souhaitable pour une vraie durabilité. C'est en tout cas indispensable sur le long terme.
- ✓ Augmenter la durée de vie L du produit (ou le rendre réparable plus facilement) : c'est une façon de lutter contre les tendances « je jette et adieu » et « l'obsolescence programmée ». Il y a plusieurs façons de faire pour qu'un produit dure plus longtemps. D'abord en le concevant de sorte qu'il dure plus longtemps, bien sûr. Mais une alternative est de le construire de sorte qu'il se répare plus facilement et à moindre coût (en augmentant d'ailleurs en parallèle le nombre de réparateurs et de centres de réparation, donc potentiellement l'emploi local). Une troisième alternative est de mettre en place un système économique/social obligeant délibérément les gens à garder plus longtemps leurs produits : la portée d'un tel système ou de telles incitations sera forcément limitée. C'est parce que beaucoup de gens aiment avoir le « produit dernier cri » qu'ils jettent leurs produits avant leur fin de vie. Souvent, dans ce cas, le produit est récupéré par un deuxième utilisateur (2^{ème} vie) et ainsi de suite jusqu'à ce que le produit ne soit même plus réparable. Obliger les gens à garder leurs produits plus longtemps ne fera que réduire la proportion des utilisateurs suivants sans augmenter pour autant la durée de vie globale.. Cette méthode pourrait être efficace dans le cas de produits réalisés dans le but d'un usage unique. C'est l'exemple des canettes en aluminium qui pourraient être récupérées par le producteur, de nouveau remplies et remises en circulation. Cette approche est toutefois très difficile à mettre en place : les gens ne veulent pas s'encombrer de tels déchets en attendant leur reprise. Il faudrait donc des contraintes fortes pour que de telles mesures puissent devenir significatives. Ce point est d'ailleurs similaire au troisième point ci-dessous :
- ✓ Réduire la fraction w de produit perdue (ou recycler le produit, ce qui revient à réduire w) : une première idée peut consister à croire qu'une réduction de la quantité de « matériau brut » (*Raw material*) dans chaque produit permettra de réduire le flux de déchets. Ce n'est malheureusement pas vrai car il existe une relation qui lie la durée de vie du produit à cette quantité de « matériau brut » w présente dans le produit comme illustré sur la Figure 7- 2 :

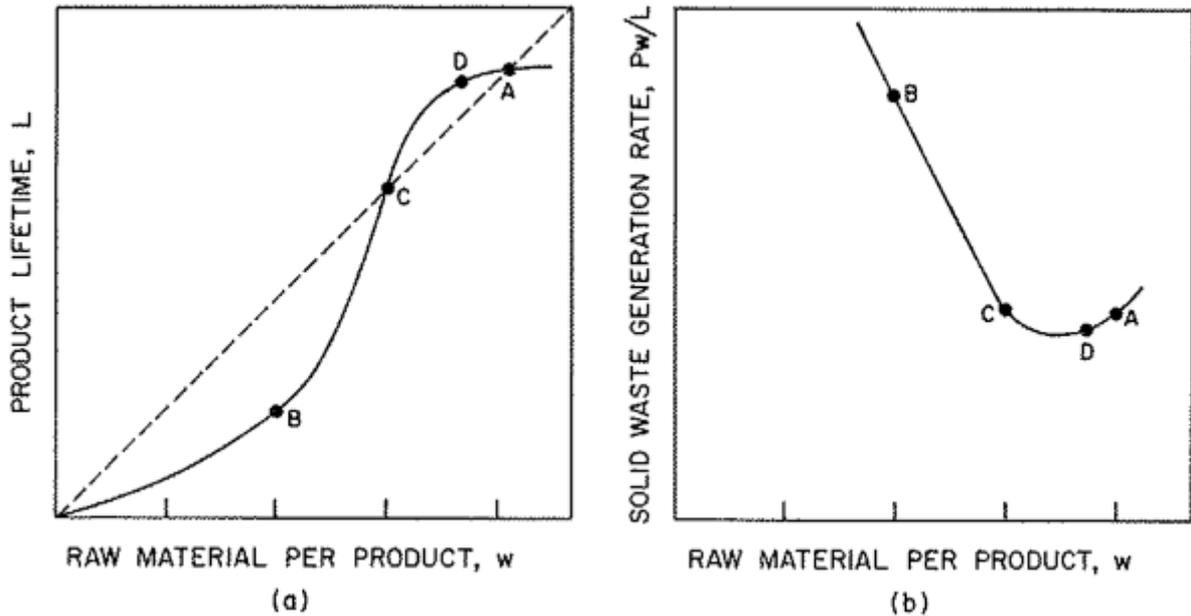


Figure 7- 2 : relations liant la durée de vie d'un produit L et la quantité de « matériau brut » w le constituant (Figure 7- 2-a à gauche) et par suite le flux de déchets produits S (Figure 7- 2-b à droite)

La Figure 7- 2 illustre une relation hypothétique entre la quantité de matériau brut w dans le produit et sa durée de vie. On voit que la durée de vie est très faible lorsque très peu de matériau brut est utilisé. Puis, une augmentation rapide de la durée de vie se produit lorsqu'un pourcentage suffisant de matériau brut existe dans le produit (point C). Lorsque la quantité de matériau brut continue à augmenter, le gain en augmentation de durée de vie est moins grand voire devient quasi-nul (point A). Il faut alors ajouter beaucoup de matériau brut pour avoir un léger gain en durée de vie.

La Figure 7- 2-b montre la relation entre le **flux annuel de déchets** $S = P \cdot w/L$ et la quantité de matériau brut w présente dans le produit, et ce pour une quantité P de produit constante.

Celle-ci est directement déduite de la Figure 7- 2-a en divisant w par L à chaque fois.

Si l'on se trouve au point A au départ, une réduction de 50% de quantité de matériau brut w nous amènera au point B mais il n'y aura pas réduction –au contraire- de la quantité w/L et donc de $P \cdot w/L$ (P étant constant).

Le point C, qui correspond à 25% de réduction de la quantité de matériau brut w dans le produit amène au même ratio $P \cdot w/L$ que pour le point A alors qu'une réduction de 10% de la quantité de matériau brut w dans le produit amène à l'objectif escompté : une réduction de la quantité w/L et donc de $P \cdot w/L$ car P est pris ici constant (point D).

On peut penser que les producteurs réduisent déjà les prix en ayant diminué la quantité de matière dans leurs produits. Par conséquent, la mise en place de **taxes indexées sur le poids des produits serait contre-productive vis-à-vis de la production de déchets**. En effet, ceci amènerait très certainement les producteurs à réduire encore la quantité de matériau brut pour gagner en poids. Comme illustré précédemment, une conséquence malheureuse serait alors d'augmenter la quantité de rebuts.

En revanche, une telle taxe sur les emballages non nécessaires serait très probablement efficace.

Il existe toutefois une autre approche pour réduire effectivement la quantité de matériau w dans un produit sans changer sa durée de vie: celle du **recyclage**.

Il apparaît que le **recyclage est le moyen le plus efficace et le plus pratique/pragmatique de réduire le flux annuel de déchets** $S = \frac{P \cdot w}{L}$. Il est toutefois préférable de **coupler cette action** à celle consistant à concevoir les produits afin qu'ils durent plus longtemps quand il n'y a pas une quantité de matière exagérée à rajouter à ces derniers.

Mais tout ceci est plus facile à dire qu'à faire dans une société de consommation.

D'abord, il faut prendre conscience que l'on parle là de millions de tonnes de déchets à trier. Non seulement une certaine automatisation est nécessaire, mais elle doit en plus se faire en polluant le moins possible.

Et même en supposant que ce problème technique soit résolu, il resterait le problème principal: celui de changer un système de fabricants, transformateurs, investisseurs, consommateurs et compagnies d'énergie (depuis celles exploitant les mines jusqu'à celles transformant l'énergie pour les usines) qui ont investi des sommes colossales pour arriver au système actuel. **Voilà le véritable frein au changement.**

Réduire le **flux annuel de déchets** $S = \frac{P \cdot w}{L}$ engendrera en soi une profonde mutation de notre société.

Alors comment faire: faut-il taxer les compagnies minières? Ou en subventionnant l'industrie du recyclage? Combien de temps faut-il attendre avant de faire l'un et/ou l'autre? Si le prix des matières premières est bas comparé au prix du produit fini, est-ce que les incitations seront suffisantes pour conserver les ressources premières pendant longtemps? etc...

C'est pour répondre à ce genre de question que le modèle dynamique présenté est utile.

Un modèle dynamique de génération de déchets solides

Avant de développer un modèle, il faut toujours savoir ce à quoi il répondra et ce à quoi il ne répondra pas.

Ici, le processus étudié est celui de le flux de matériau depuis les matières premières jusqu'au déchet sur une durée de l'ordre de 100 ans. Cette durée est choisie car elle dépasse l'indice des réserves mondiales de la plupart des minerais et métaux et que l'on peut ainsi prévoir des changements marqués (coût d'extraction, changement d'usage, etc...) sur une telle période.

Toutefois, en prenant ce parti pris, on exclut du champ d'analyse les fluctuations très rapides (variation journalière des prix, fluctuations saisonnières...).

Les questions posées sont : qu'est-ce qui détermine la taille du flux depuis la ressource jusqu'au déchet ? Qu'est-ce qui détermine la composition en matériaux vierges/recyclés dans le flux ? Comment peut-on augmenter la fraction recyclée ? Comment réduire la génération de déchets ? Quels avantages à augmenter maintenant la fraction recyclée au dessus de celle dictée par des incitations purement économiques ?

La structure du modèle a été développée pour étudier la **dynamique d'une seule ressource non renouvelable**.

L'exemple pris concerne donc une ressource non renouvelable : **le cuivre**. Mais la structure du code permet d'appliquer les calculs à toute autre ressource non renouvelable simplement en changeant les valeurs des données d'entrée sans changer le code.

Les limitations liées au fait que l'on limite le modèle à un seul matériau sont :

- ✓ Que le « produit » issu de ce matériau est un mix usuel des objets fabriqués à partir d'une tonne de matériau brut : soit 36% de fil, 48% de tubes et feuilles, 15% de moules et 1% de poudre.
- ✓ Que le marché de production du cuivre est unique : on ne s'intéresse ni à la concurrence entre les firmes ni au comportement des différents acheteurs.
- ✓ Que le niveau de production est uniquement lié à la demande et pas à la qualité, au prix, à la publicité faite ou encore à la facilité d'usage des produits fabriqués. On admet qu'il existe une demande spécifique pour le produit pour un prix donné. Cette demande ne varie pas si le prix reste constant. C'est une limitation (facilement modifiable) utilisée ici pour mettre en évidence le problème de génération de déchets.
- ✓ Que les autres facteurs de production (énergie, magasins, etc...) sont abondants : ce ne sont donc pas les facteurs limitants ici. Seule la quantité de matériau brut (la ressource) l'est in fine.
- ✓ Qu'il n'y a pas de modification dans les techniques d'extraction ou de recyclage.

Le lecteur non intéressé par le détail des sous-routines peut passer ce chapitre sans problème et se rendre à la page 22.

Boucle 1 : La boucle du coût d'extraction de la matière première

La boucle 1 est représentée sur la Figure 7- 3. C'est une boucle négative qui indique que le déclin de ressource naturelle (NR) se traduit par une augmentation du coût d'extraction (EC) des matières premières restantes quand aucune nouvelle technique d'extraction n'est introduite. La Figure 7- 3 illustre cette relation qui traduit simplement le fait que plus les matières premières se font rares et plus il faut aller loin et/ou profond pour les trouver et les extraire (puisqu'on extrait toujours en premier ce qui est plus facile..).

Le coût d'extraction influence lui-même le taux d'extraction (ER : tonnes de cuivre extraites par année ici).

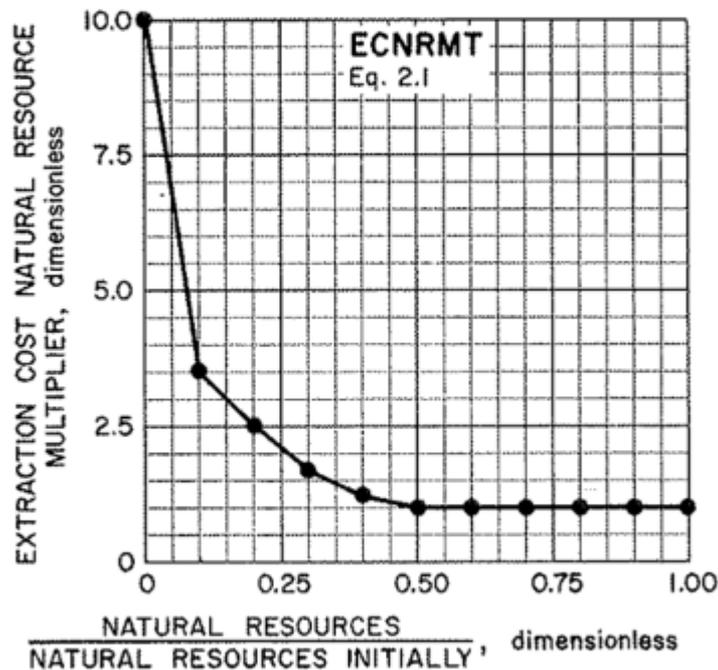
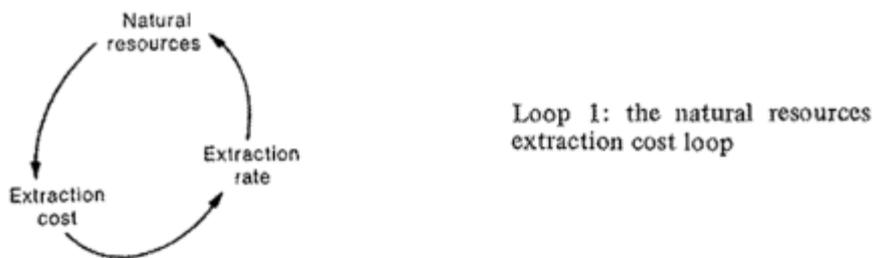


Figure 7-9 The increase in extraction cost caused by depletion of natural resources
The figure is a graphical representation of the tabular relationship used in the computer model. The relationship is denoted by the symbol, \overline{ECNRMT} in the DYNAMO flow diagram in Figure 7-21.

Figure 7- 3 : Boucle 1 : La boucle du coût d'extraction de la matière première

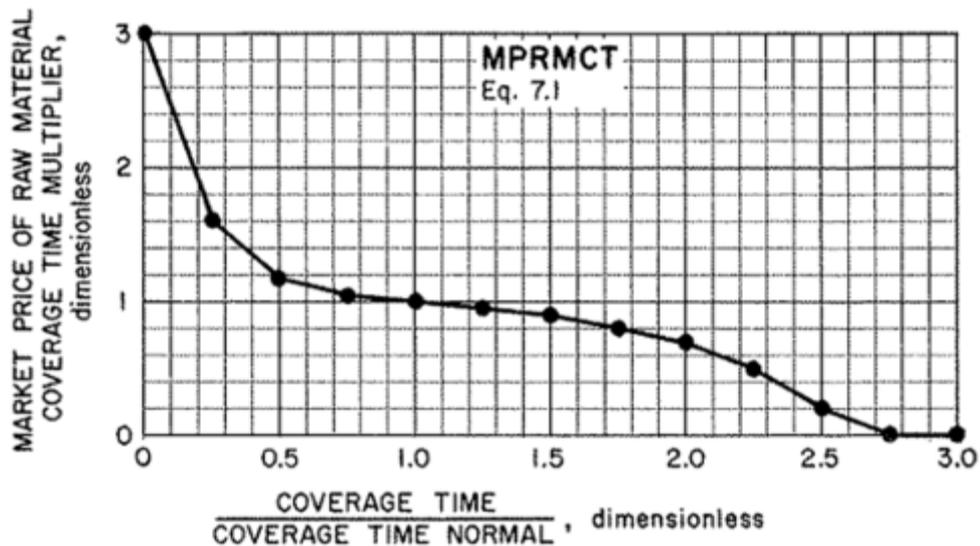
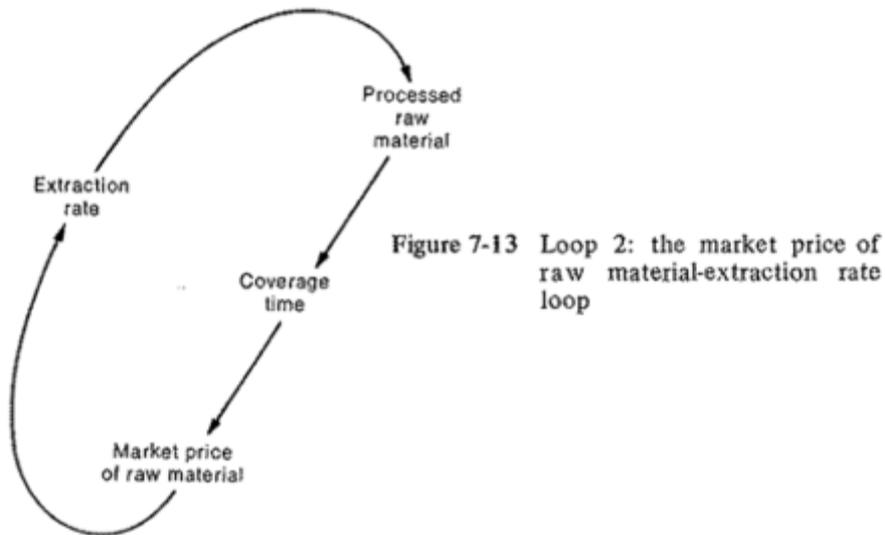
La quantité qui sert à l'industrie minière pour comparer le coût d'extraction *EC* au marché est le prix du marché pour la matière brute (*MPRM* : Market Price for Raw Material). Le taux d'extraction est élevé lorsque le coût d'extraction est bas par rapport au prix du marché pour la matière brute. Ce sera l'inverse lorsque le contraire sera vrai. Le taux d'extraction diminue bien sûr le stock de réserve, ce qui boucle la boucle.

A ce stade, on peut noter que les progrès technologiques ne permettent pas de changer la donne : en effet, les coûts d'extraction, qui auraient naturellement tendance à augmenter sans progrès technologiques ont été maintenus relativement stables grâce aux progrès techniques. Mais ceci s'est fait au dépend d'une augmentation de la quantité d'énergie consommée par tonne de cuivre extraite, ce qui ne sauve pas les ressources de toute façon puisqu'on substitue ici des ressources non renouvelables par d'autres (ex : gaz ou pétrole pour l'extraction).

Comme on s'intéresse ici, en relatif, aux impacts comparés de différentes politiques, il n'est donc pas important de connaître exactement le délai introduit par les avancées technologiques dans l'augmentation des coûts.

Boucle 2 : Le prix du marché pour la boucle d'extraction de la matière première

La boucle 2 est négative : elle est représentée sur la Figure 7- 4. Quand le prix du marché pour la matière première augmente, le taux d'extraction augmente et il y a un flux plus important de matière vers le stock de « matière première processée » (*PRM* : Processed Raw Material). Cette *PRM* est la quantité de matière première qui -une fois extraite et/ou recyclée, a été nettoyée et/ou purifiée- in fine est mise à disposition des industriels de la transformation (plus loin appelés « producteurs » ou « fabricants »).



The determination of market price from coverage time

Figure 7- 4 : Boucle 2 : prix du marché pour la boucle d'extraction de la matière première

Toutefois, il existe un stock optimum pour le producteur : en effet, compte-tenu des pertes au cours du stockage, du coût de celui-ci, des grèves et autres vols, le stock ne doit être ni trop gros ni trop petit par rapport à la consommation moyenne de produit manufacturé.

Supposons un taux de consommation moyen (*ACR* : Average Consumption Rate). On définit un Temps de Recouvrement Normalisé (*CTN* : Normal Coverage Time). C'est la durée correspondant à la consommation moyenne de matière première (égale donc au taux moyen de production de cette matière).

$$CTN = \frac{\text{stock désiré de matière processée}}{\text{taux moyen de production}} \quad \text{Eq. 3}$$

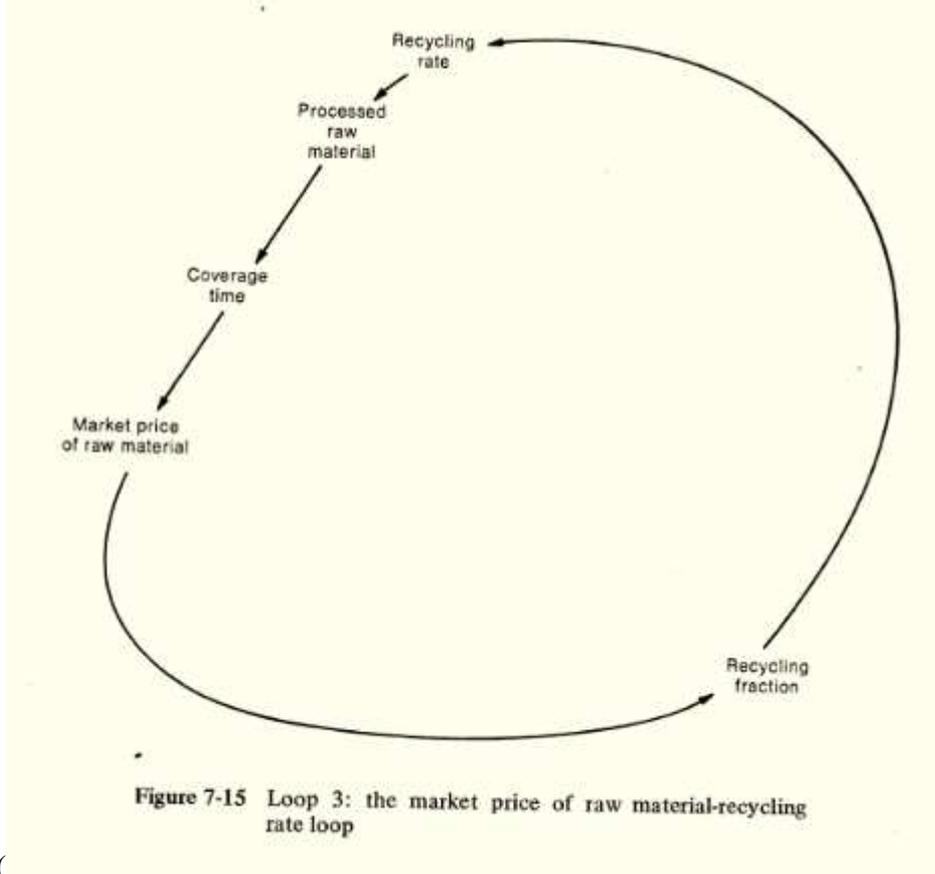
Le prix du marché pour la matière première est déterminé par la taille relative du *CTN* et la taille instantanée de temps de recouvrement *CT*, avec :

$$CT = \frac{\text{stock ins tantan é de matière processée (PRM)}}{\text{taux moyen de production (APR)}} \quad \text{Eq. 4}$$

Si *CT* devient trop grand, les « gardiens du stock » vont diminuer les prix pour la matière première stockée. Par conséquent, le prix du marché pour les matières premières *MPRM* va diminuer. La boucle 2 a tendance à ajuster le prix du marché pour les matières premières (*MPRM*) à l'offre de matière de sorte à atteindre un optimum dans le temps de recouvrement, défini ici par le taux moyen de production *APR*.

Boucle 3 : la boucle de recyclage / prix du marché des matières premières.

La boucle 3 représente la seconde boucle grâce à laquelle le stock de « matière première processée » *PRM* peut être augmenté. Il s'agit de la boucle de recyclage



(Figure 7- 5).

Dans celle-ci, le prix du marché de la matière première *MPRM* (Market Price of Raw Material) détermine la fraction recyclable (*RCF* : Recycling Fraction). *RCF* représente la fraction du stock existant de rebuts *SW* qui est recyclée par année. Par exemple, une fraction *RCF* valant 0.05 par année indique que 5% du total du cuivre inventorié dans les décharges, dans les déchetteries et autres casses automobiles, est recyclé par an.

Le flux de matériau recyclé *RCR* (Recycling Rate) vers le stock de « matériau processé » *PRM* est égal à la fraction de recyclage *RCF* (Recycling Fraction) par la quantité courante de rebuts *SW* :

$$RCR = RCF \times SW \qquad \text{Eq. 5}$$

On notera incidemment qu'un flux important de matériau recyclé nécessite à la fois une grande fraction de recyclage et un fort stock de rebut.

Notez qu'une fraction de 0.05 par an ne veut pas dire que 5% de tout le cuivre utilisé pour produire de nouveaux objets est recyclé. Pour obtenir cette quantité -c'est-à-dire la fraction de la quantité totale de cuivre utilisée en production qui est recyclée-, on doit comparer *RCR* avec le flux de production *PR* (Production Rate).

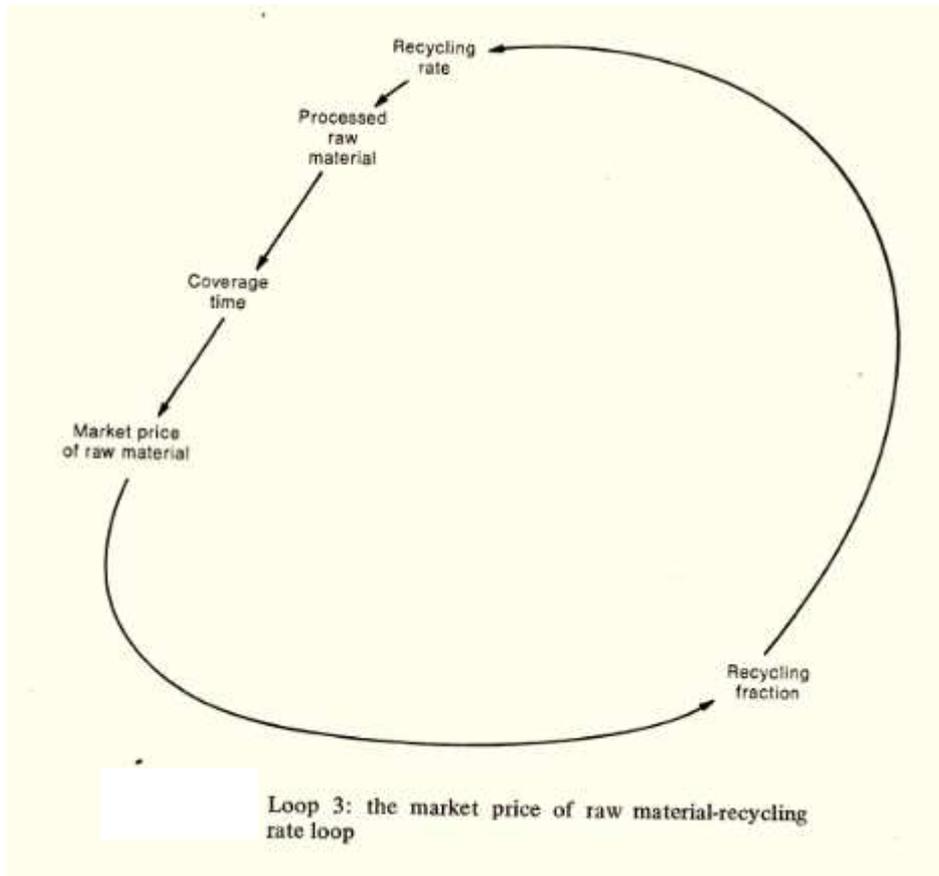


Figure 7- 5 : Boucle 3 : boucle liant, grâce au recyclage, le prix de la matière première à la quantité de « matière première processée ».

La fraction recyclée *RCF* est déterminée en comparant le prix du marché de la matière première *MPRM* avec le coût de recyclage des rebuts. Le coût du recyclage *RCC* (Recycling Cost) consiste essentiellement en coût de la main d'œuvre pour collecter et trier les rebuts.

Typiquement, une tonne de rebut urbain aux USA dans les années 70 contenait 7% de métal en poids. Le coût de collecte était d'environ 20\$ et le coût de tri (à la main) d'environ 10\$. Donc, si le rebut ne contient qu'environ 1% de cuivre et que le reste n'est pas valorisable, cela coûterait environ 3000\$ pour recycler 1 tonne de cuivre. Or, à cette époque, le coût d'extraction de cuivre « vierge » était d'environ 700\$ la tonne. Pour cette raison, le cuivre

n'était pas recyclé dans les déchets urbains à cette époque

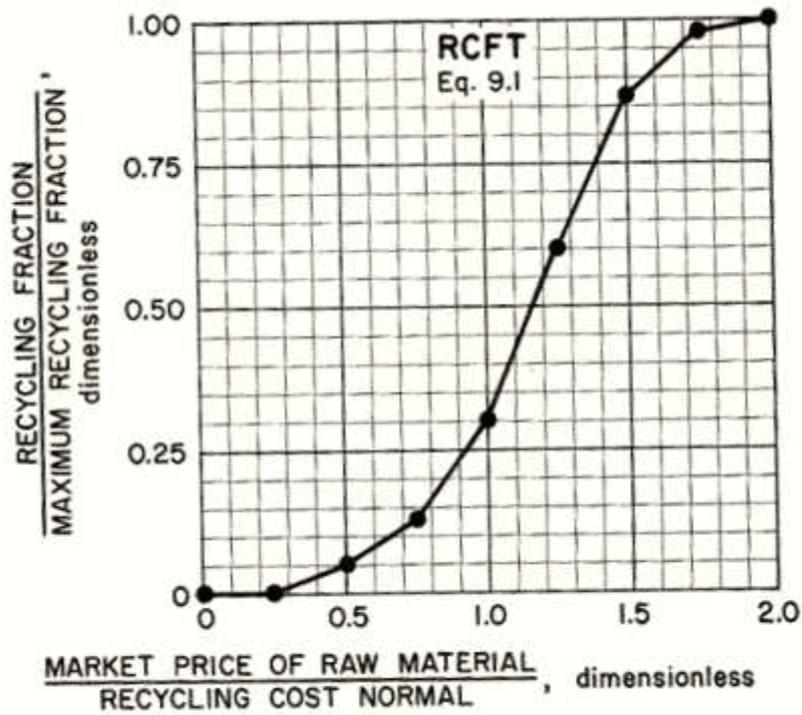


Figure 7-16 The dependence of the recycling fraction on the market price of raw material

Figure 7- 6).

Tous les déchets ne viennent pas de la ville. Les déchets industriels sont également très importants et ils sont souvent moins chers à recycler. Ils sont donc intéressants, même à faible coût de matière première. Plus les prix des matières premières augmenteront, plus les déchets

autres (urbains notamment) deviendront eux-aussi intéressants à recycler comme l'indique la

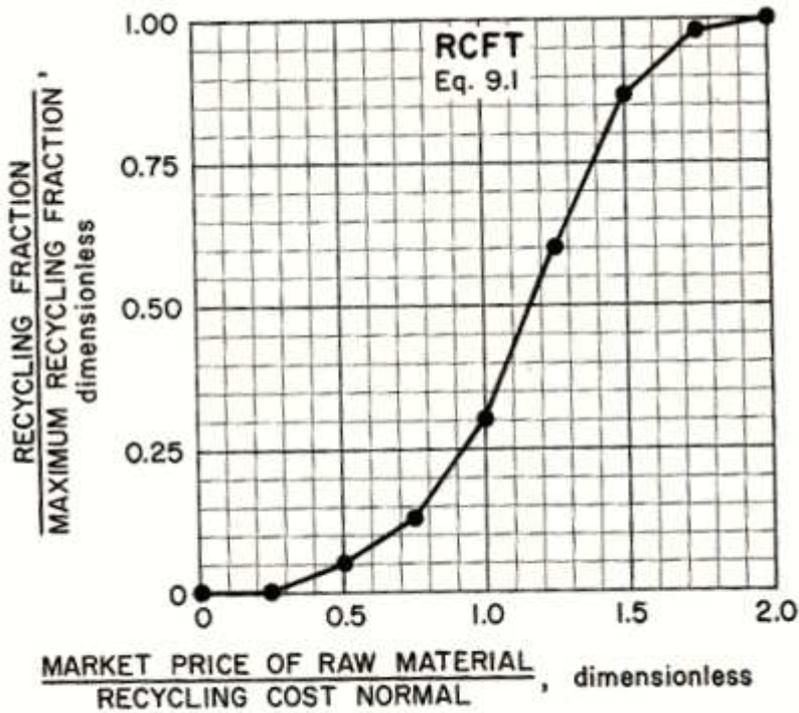
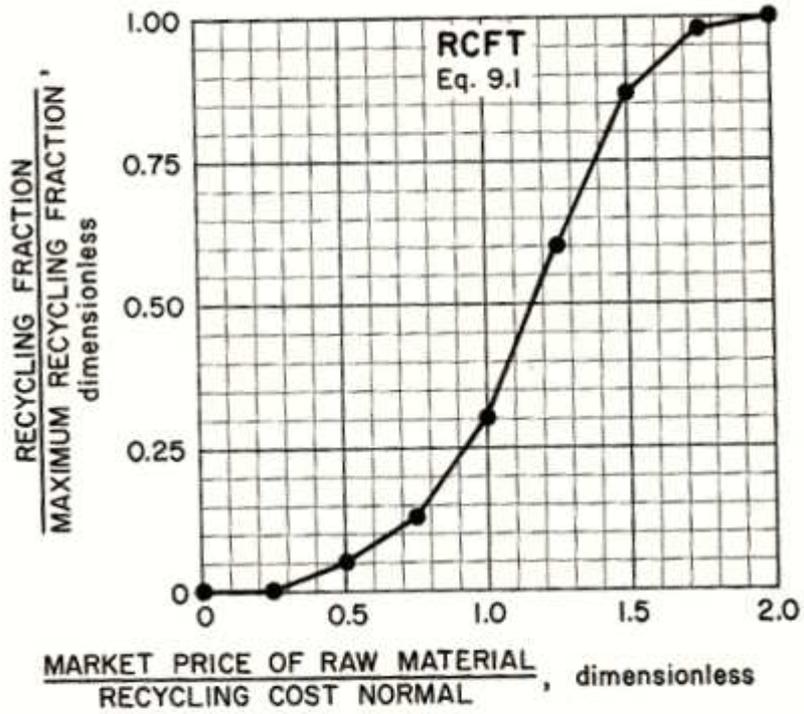


Figure 7-16 The dependence of the recycling fraction on the market price of raw material

Figure 7- 6.

On fait ici l'hypothèse implicite que toutes les compositions des rebuts sont les mêmes dans toutes les décharges et exutoires, partout et tout le temps. C'est évidemment faux. Les sources de rebuts les plus faciles et accessibles seront exploitées les premières ce qui aura comme conséquence que le taux de matière recyclable augmentera avec les temps dans les exutoires moins accessibles. On néglige volontairement cet effet dans ce modèle, en supposant qu'il ne joue pas au 1^{er} ordre et qu'il ne changera pas fondamentalement la tendance du modèle.



The dependence of the recycling fraction on the market price of raw material

Figure 7- 6 : dépendance entre fraction recyclée et coût de la matière première sur le marché

En résumé, l'effet de ces 2 boucles de rétroaction (boucle 2 Figure 7- 4 et boucle 3

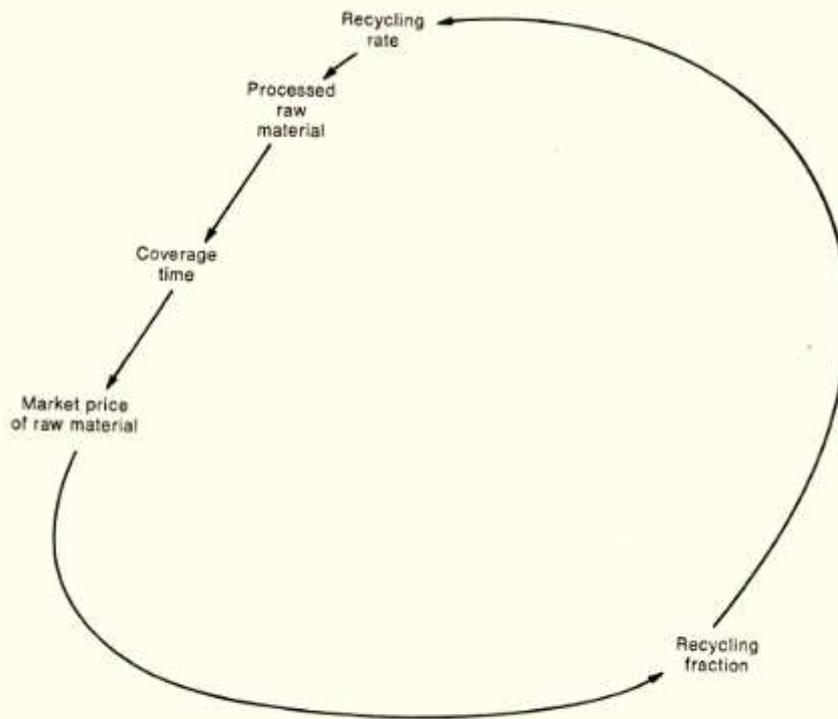


Figure 7-15 Loop 3: the market price of raw material-recycling rate loop

Figure 7- 5) est d'ajuster le prix de la matière première de telle façon que la somme {extraction + recyclage} fournissent exactement la quantité voulue de « matériau traité » *PRM* (prêt à être transformé) pour donner le recouvrement optimum étant donné un prix et un flux moyen de production *APR*.

A ce stade, les trois boucles présentées précédemment suffisent à comprendre le comportement général du système :

- Tant que le prix du marché de la matière première *MPRM* est bas, la demande est couverte essentiellement par l'extraction.
- Peu à peu, la ressource naturelle *NR* se raréfie et le coût d'extraction *EC* augmente. Au contraire à ce stade, le coût de recyclage reste relativement constant. Il peut même descendre si les rebuts *SW* s'accumulent par endroit, fournissant plus de matière recyclable. Plus les prix de la matière première augmentent, plus il devient avantageux de satisfaire la demande avec une fraction de plus en plus importante de matériau recyclé.
- A la fin, l'extraction s'arrêtera lorsque le coût d'extraction de la matière restant dans le sol deviendra prohibitif. A ce stade, l'utilisation du matériau en question dépendra uniquement du recyclage.

Toutefois, même si ces 3 boucles sont suffisantes pour donner le comportement général du système, nous devons ajouter plusieurs autres sous-boucles pour répondre à nos questions. Par exemple, pour tenir compte des inévitables pertes de matière dans le bouclage système.

Ainsi, il est important de noter que ce que nous appelons « rebuts solides » est la fraction de rebut que la société peut effectivement recouvrir. La partie des rebuts définitivement perdue (ex : sous forme de particules fines dispersées dans la nature, sous forme de corrosion, etc...) peut être considérée comme de la pollution.

Tant que la matière reste solide, on peut essayer de la recycler. Une fois dispersée ou diffuse, ce n'est généralement plus possible.

Dans notre modèle, la pollution *POLL* représente la ressource naturelle *NR* définitivement perdue.

De plus, il est important de noter qu'un changement dans le prix de marché de la matière brute *MPRM* affecte aussi le prix des produits qui seront finalement fabriqués à partir de cette matière brute. Or un changement de prix de ce produit *MPP* sur le marché induit lui-même une modification de la demande sur ce produit, et ce de deux façons différentes :

- D'abord, un prix faible induit une tendance pour les consommateurs à stocker davantage de produits. Cela augmente le nombre de produits en cours d'usage *PIU* en tous points du temps (ex : pour les voitures ; une voiture désirera plus de voitures si les prix sont faibles, quitte à les stocker au garage davantage).
- Mais a contrario, des prix faibles ont tendance à diminuer les actions d'entretien et de réparation. Du coup, les objets se détériorent plus vite et sont jetés plus rapidement. De facto, leur durée de vie effective diminue (et les voitures vont à la casse plus rapidement...).

La balance entre les 2 effets dépend évidemment du type de produit considéré : s'il s'agit d'un produit à utilisation unique (lames de rasoir, matériaux d'emballage...), la dépendance entre le prix et la durée de vie *PLT* (Product Life Time) sera très forte.

Tandis que ce sera moins vrai pour des produits stockables plus facilement et à usages multiples, ou bien des produits faits pour des usages plus longs (voitures, maisons...) et pour lesquels, souvent, plusieurs « vies » existent avant leur détérioration définitive et ultime (cas des voitures). En revanche, lorsque les prix sont bas, de tels produits sont souvent davantage « stockés » (cas des voitures, des résidences secondaires, etc...).

Le cas étudié ici (câbles et tubes de cuivre) appartient probablement à cette seconde catégorie d'objets.

Ainsi, si un autre matériau venait à être étudié, cette dépendance entre le prix et la durée de vie mériterait d'être revue.

De plus, il est à noter que le prix ne détermine pas de façon triviale la **quantité de produit que l'on veut utiliser à tout instant du temps (*DPIU* : Desired Product In Use)** et sa durée de vie (*PLT* : Product Life Time).

En revanche, la grandeur qualifiable de « coût par unité de temps d'utilisation du produit » *YCOP* (Yearly Cost of Product) est la grandeur la plus pertinente. On est prêt à payer davantage pour un produit qui dure plus.

On a la relation : $YCOP = \frac{MPP}{PLT}$ *Eq. 6*

Toutefois, il peut s'écouler un temps important (parfois des années) avant qu'un changement dans le *YCOP* soit ressenti par le consommateur (cela dépend notamment de l'ordre de grandeur de la durée de vie *PLT*).

Donc, ce n'est pas directement *YCOP* qui est la bonne grandeur mais une grandeur dérivée de celle-ci : le « **coût ressenti ou perçu par unité de temps d'utilisation du produit** » *YCOPP*. Cette grandeur permet de définir la demande pour le produit.

Dans le cas des produits fabriqués à base de cuivre, la durée de vie *PLT* moyenne considérée est prise à **20 ans** (durée moyenne entre la production et la mise au déchet des produits fabriqués). Dans ce cas, des études économétriques ont montré que *YCOPP* valait environ **15 ans**.

Boucle 4 : la boucle « Coût annuel du Produit – Flux de production »

La boucle 4 représente l'effet du prix sur la quantité de produit « désirée » à tout instant du temps (*DPIU : Desired Product In Use*). Elle est schématisée sur la Figure 7- 7.

Loop 4: The Yearly Cost of Product-Production Rate Loop. The effect of price on the desired number of products in use *DPIU* is represented in Loop 4 (Figures 7-17 and 7-18). The market price of raw material *MPRM* affects the market price

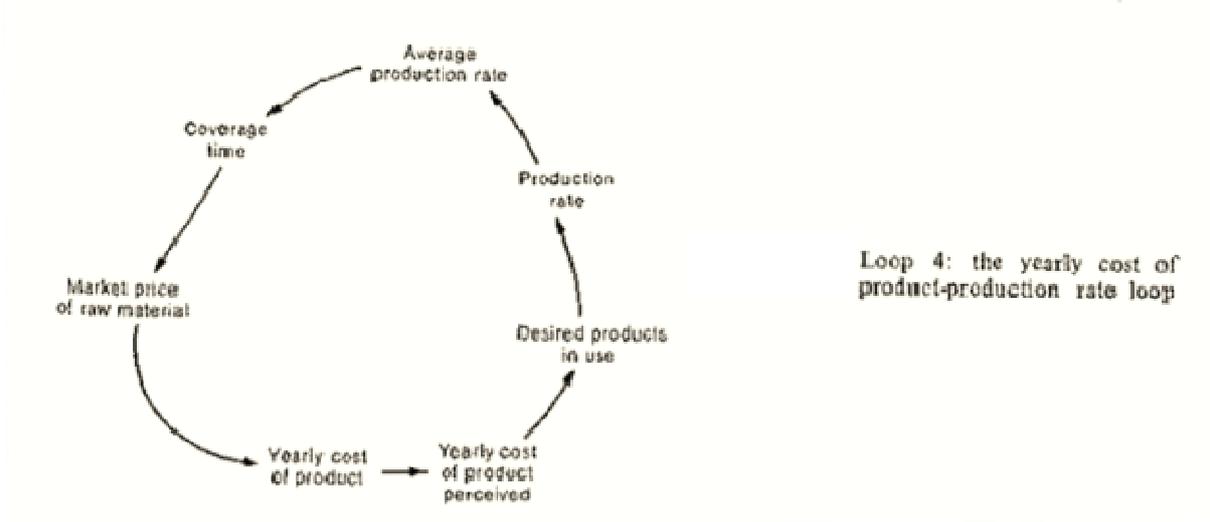


Figure 7- 7 : Boucle 4 : boucle « produit – flux de production »

Le prix du marché du matériau brut *MPRM* affecte le prix du marché du produit *MPP*, qui avec la durée de vie du produit *PLT*, détermine le coût annuel du produit ou « coût par unité de temps d'utilisation du produit » *YCOP* et donc également le « coût perçu ou ressenti par unité de temps d'utilisation du produit » *YCOPP*.

Or, le *YCOPP* détermine directement la quantité de produit « désirée » *DPIU* selon une relation du type de celle montrée sur la Figure 7-

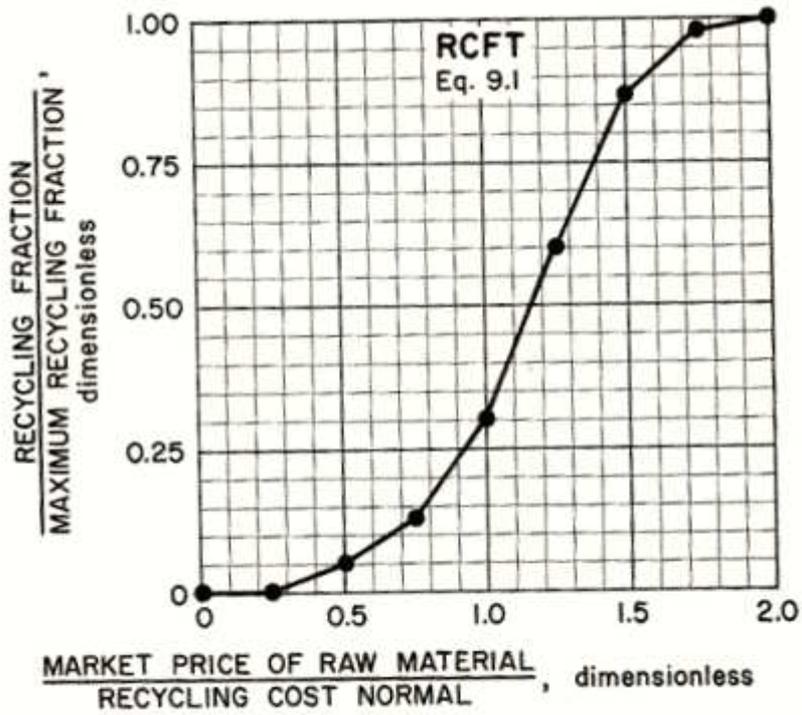
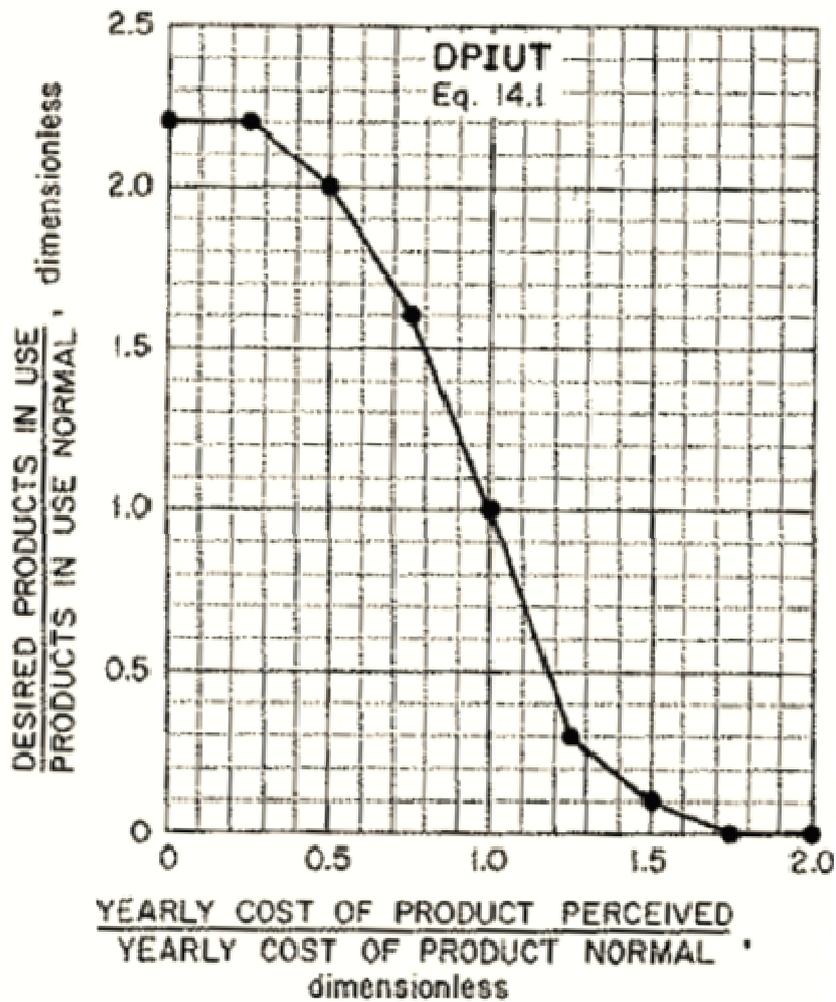


Figure 7-16 The dependence of the recycling fraction on the market price of raw material

8

Figure 7- 6.



The demand curve for the product

Figure 7- 8 : Boucle 4 : effet du prix sur le *DPIU*

Retrancher le nombre de produits en cours d'usage à tout instant t (*PIU* : *Products In Use*) des produits « désirés » *DPIU* donne le nombre de produits additionnel que le marché pourra absorber avant qu'il ne soit saturé.

L'hypothèse précédente était que l'industrie essaye juste de satisfaire cette demande existante pour ce produit.

De façon cohérente avec cela, supposons maintenant que l'industrie décide de saturer le marché en une période donnée (*MST* : *Market Saturation Time*).

Le « taux de production *PR* » nécessaire résultant sera alors :

$$\text{taux de production } PR = \frac{DPIU - PIU}{MST} \quad \text{Eq. 7}$$

Ce « taux de production » est donc la vitesse à laquelle l'industrie dans son ensemble convertit les *matériaux bruts transformés PRM* en produits finis. Ce taux est moyenné sur une durée donnée (la durée de moyennage : *Averaging Time AT*) pour arriver au taux moyen de production *APR*, qui est la quantité nécessaire pour calculer le temps de recouvrement *CT* fourni par le stock de matériau brut transformé *PRM*.

Donc la boucle 4 agit également en affectant le prix du marché des matériaux bruts *MPRM*. Son but implicite est d'altérer le « nombre de produits désirés en cours d'usage » *DPIU* de telle sorte que le taux de production *PR* s'accorde avec le stock de matériau brut transformé *PRM* à un prix stable.

Boucle 5: le coût annuel de la boucle « produit-rebut »

La boucle 5 explicitée sur les Figure 7- 9 décrit l’effet du prix sur la durée de vie du produit *PLT* et également comment le coût annuel du produit *YCOP* est obtenu.

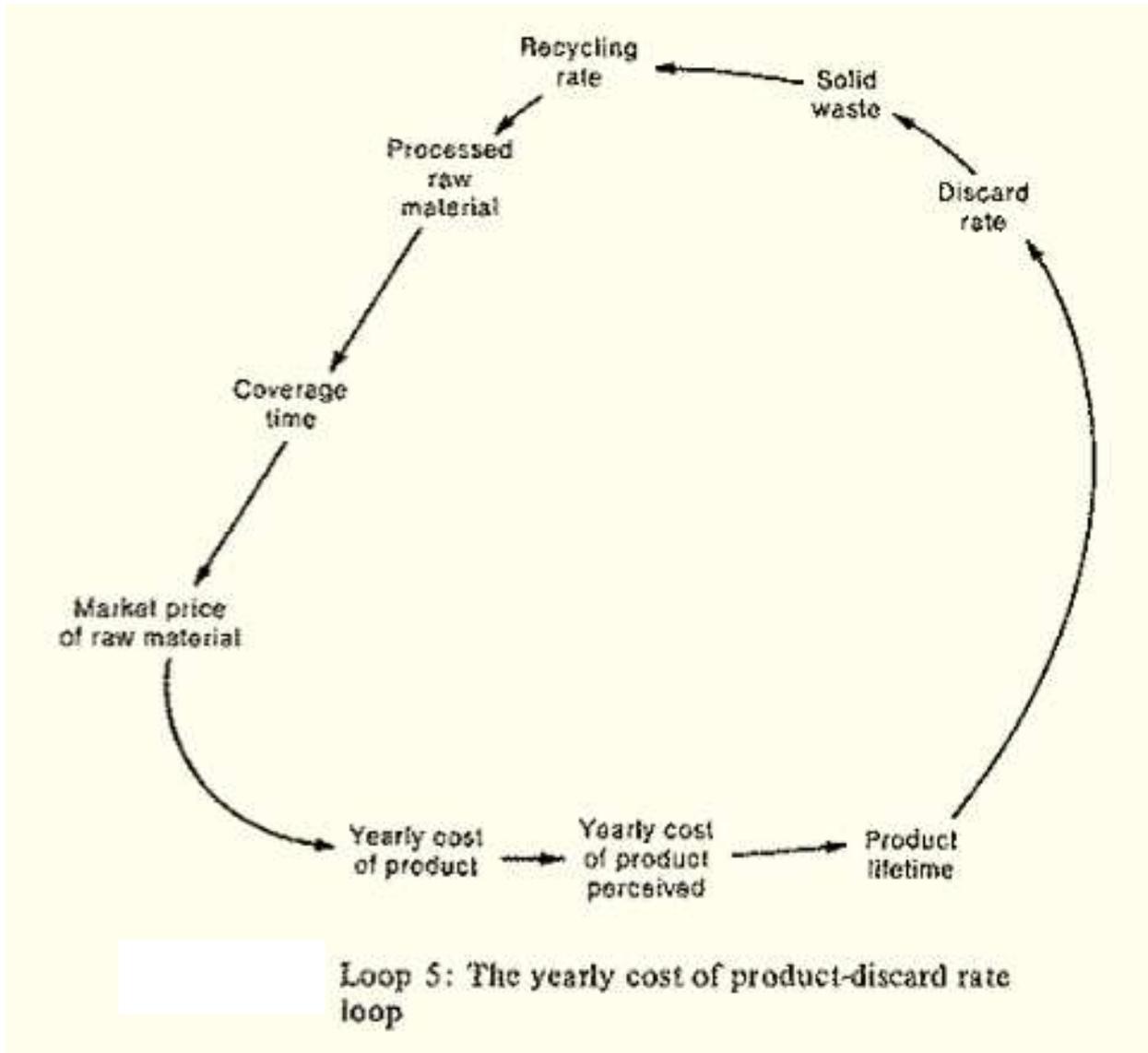


Figure 7- 9 : Boucle 5 : le coût annuel de la boucle « produit-rebut »

La durée de vie du produit *PLT* (Product Life Time) est un paramètre fondamental puisque c’est lui qui détermine la **vitesse à laquelle les produits sont mis au rebut** : le flux de rebut *DR* (Discard Rate) est donc donné par la relation :

$$DR = \frac{PIU}{PLT} \quad \text{Eq. 8}$$

On retrouve ici la relation déjà donnée en introduction.

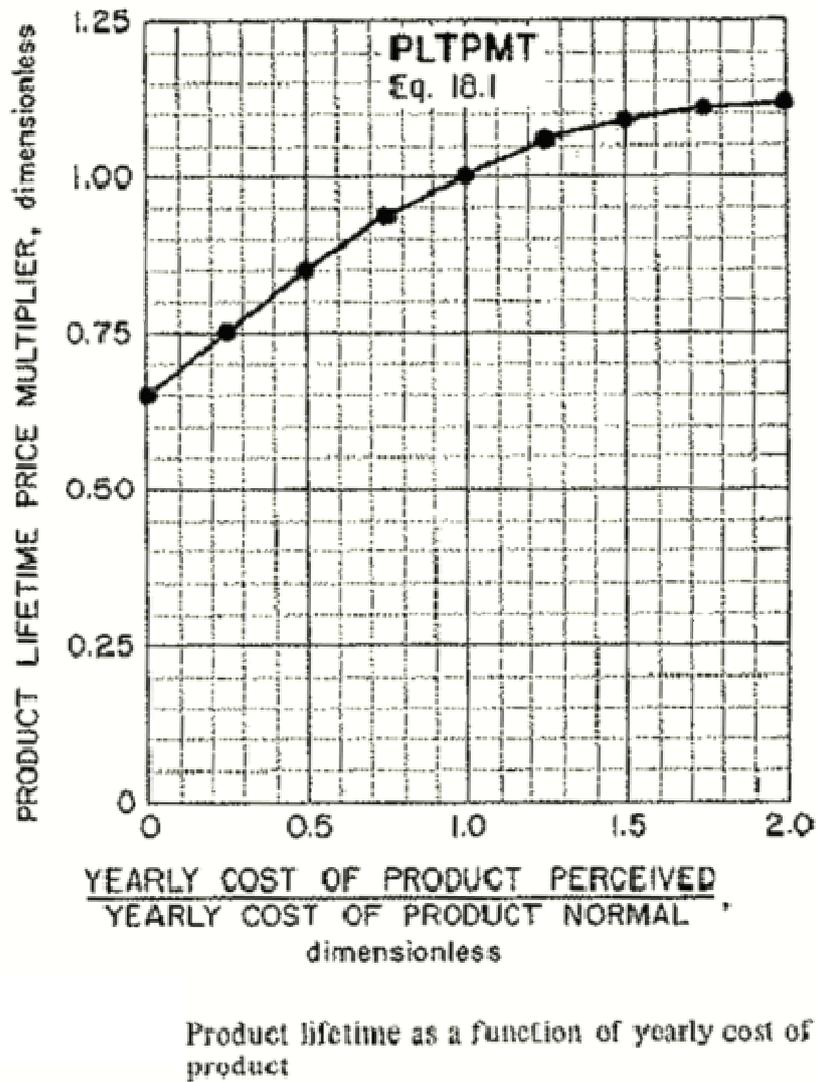


Figure 7- 10 : Boucle 5 : durée de vie du produit *PLT* fonction des coûts annuels du produit (*YCOP* et *YCOPP*)

Comme un faible prix annuel de produit *YCOP* donne une faible durée de vie, alors il se traduit aussi par un taux de déchets solides *SW* (Solid Waste) plus important.

Cette branche de la boucle de rétroaction se referme sur le taux de recyclage *RCR*.

Finalement, l'ensemble de ces boucles a été codé avec le langage DYNAMO. La figure suivante illustre les boucles précédentes :

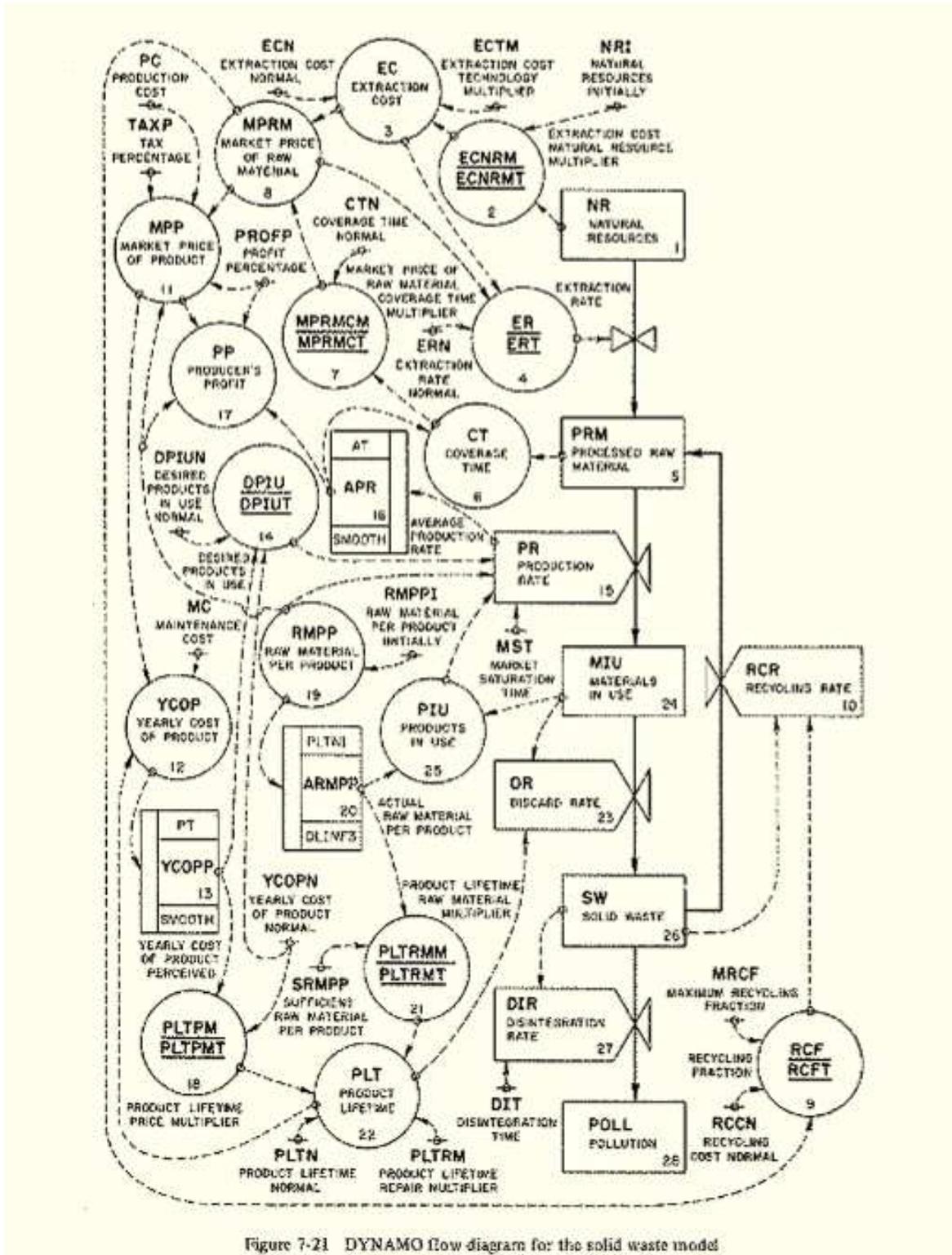


Figure 7-21 DYNAMO flow diagram for the solid waste model

Figure 7- 11 : diagramme d'ensemble des boucles de rétroaction du modèle dynamique de génération des déchets solides.

Résultats : effets de différentes politiques sur la génération de déchets

Dans les runs qui sont présentés par la suite, les données choisies sont celles permettant de représenter l'industrie du cuivre (*celle des années 70 aux USA à tout le moins*).

Néanmoins, il est important de retenir que l'auteur n'a **pas cherché ici à faire des prévisions**. Ce qui compte donc, c'est la **variabilité relative** d'un scénario à l'autre, c'est-à-dire les **changements de tendances** opérés et **leur constante de temps** suite à telle ou telle décision ou politique. Par exemple, si dans un run donné, le résultat est le doublement de la quantité de recyclage pendant 20 ans, alors il est faux de penser que la politique qui a conduit à ce résultat conduirait obligatoirement à ce taux dans le monde réel, ne serait-ce que parce qu'ici, la croissance exponentielle de la demande n'a pas été prise en compte. Mais si dans un autre run, c'est un quadruplement de la quantité de recyclage pendant 20 ans qui est obtenue, alors on peut dire que la politique de ce run produirait effectivement une augmentation de la quantité de recyclage par rapport au premier run.

Les **conditions initiales** des runs ont été choisies de sorte que les sorties soient cohérentes du marché à l'instant T_0+20 ans en 1974. Autrement dit, l'instant **T_0 correspond environ à l'année 1954**.

Pour information, en 1974, le marché du cuivre se caractérisait par un flux de production PR de 6×10^6 tonnes par an (dont environ **70% de matière vierge** et **30% de matière recyclée**), un indice statique mondial de réserve de 40 ans, un prix du cuivre $MPRM$ de 660\$/tonne et une quantité de matière en cours d'usage MIU de 120×10^6 tonnes environ.

Les données initiales de tous les runs sont identiques et choisies de sorte à respecter les valeurs observées empiriquement en 1974 i.e. à T_0+20 ans. Dans tous les runs, sauf mention explicite contraire, les modifications apportées le sont à T_0+25 ans, c'est-à-dire aux alentours de 1979.

- Le résultat du **premier run** est donné sur la Figure 7- 12 ci-dessous. Dans ce **run** « **standard** » on suppose qu'il n'est fait **aucun recyclage**. Le résultat est intuitif : les ressources naturelles *NR* diminuent rapidement tandis que la pollution et les déchets augmentent rapidement. Dès que les réserves approchent zéro, le nombre de produits en usage *PIU* diminue rapidement à cause de l'effondrement du taux d'extraction *ER*. Les profits associés des « transformateurs » (ceux qui transforment la matière brute en produit fini) suivent évidemment le même chemin...

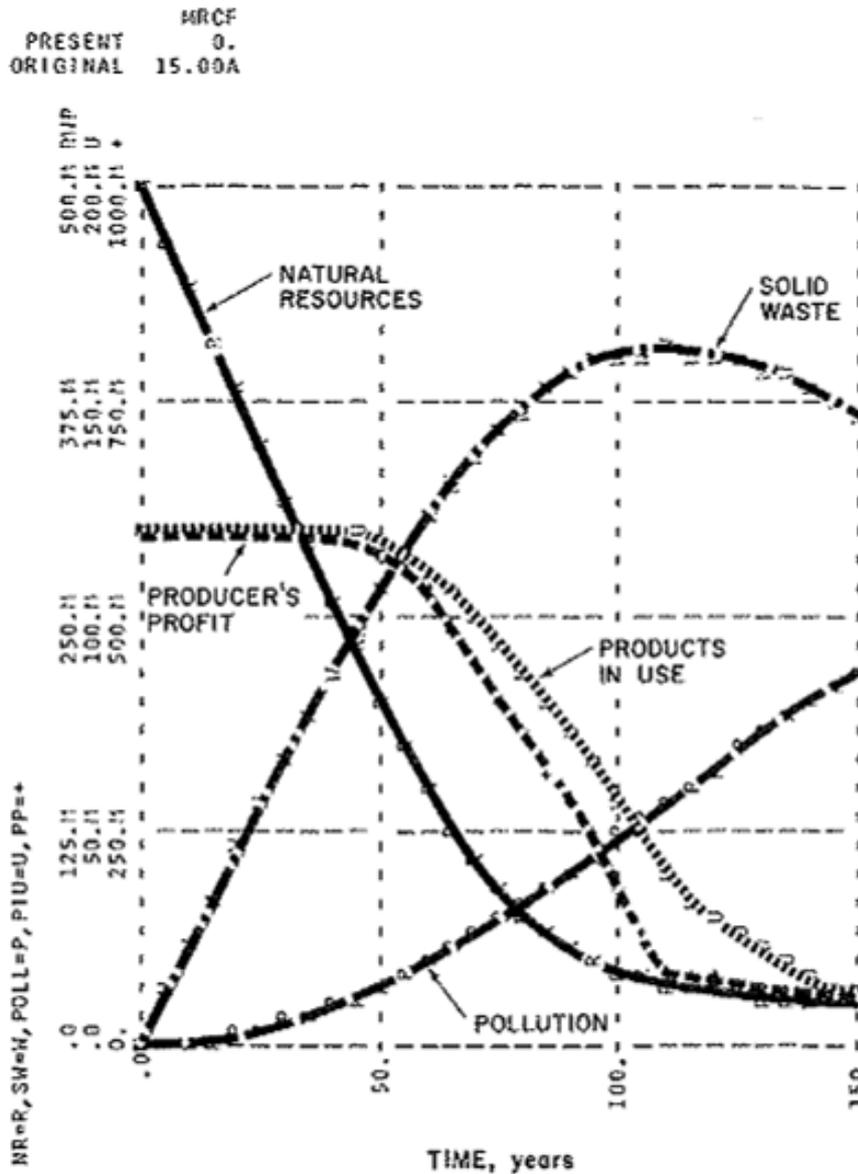


Figure 7- 12 : Run N°1 = run « standard » : pas de recyclage du tout

On notera qu'après 100 ans, les déchets solides SW (Solid Waste) diminuent : après cela, il y a plus de flux de matière passant directement des déchets à la pollution que le flux de produits en cours d'usage vers les déchets solides.

- Le résultat du **run N°2**, dans lequel est supposée une fraction maximum de recyclage *MRCF* égale à **1,5% par an** -ce qui correspondait approximativement à la valeur en 1974- est moins morose :

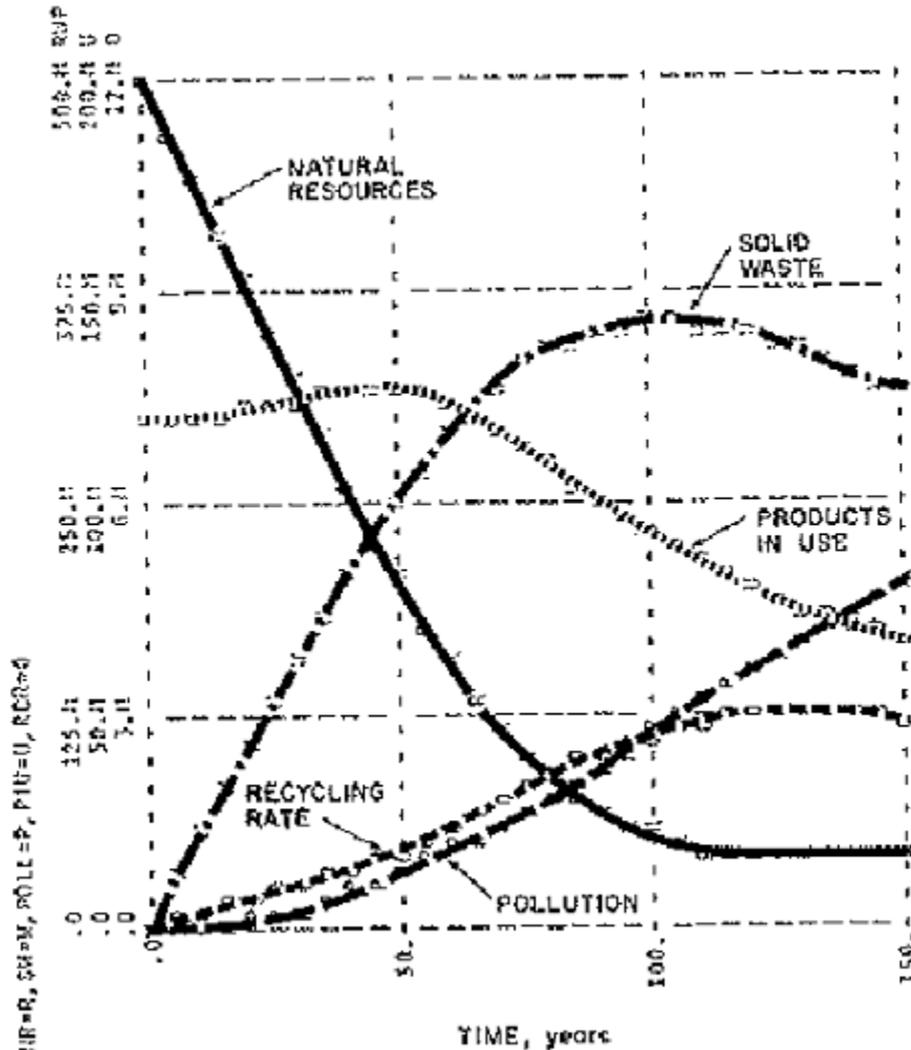


Figure 7- 13 : Run N°2 = fraction maximum de recyclage *MRCF* de 1,5% par an

On obtient cette fois un taux de recyclage *RCR* non nul, une moindre pollution et moins de déchets. Il reste un peu plus de matières premières à la fin du run. Mais la différence avec le run 1 n'est pas très grande car la disponibilité supplémentaire de matière induite par le recyclage se traduit par plus de produits en usage (*PIU*), c'est-à-dire à un plus haut niveau de vie au long du run.

On pourra retenir aussi que le prix du marché de la matière première *MPRM* est plus bas que dans le run N°1, de même que la durée de vie. Les profits des « transformateurs » sont gigantesques par rapport au run N°1.

Comme cela va dans le bon sens, les runs suivants visent à identifier la voie la plus optimale pour augmenter cet effet positif du recyclage. Cela revient à répondre à la question : **faut-il favoriser le recyclage en subventionnant ou au contraire décourager l'extraction de la ressource en la taxant ?** Les runs suivants visent à étudier la possibilité d'augmenter le taux de recyclage *RCR* (Recycling Rate) très tôt, ie dès le début de la déplétion de la ressource naturelle.

- Le **run N°3** (Figure 7- 14) montre l'effet d'une **taxe à 50%** sur l'**extraction** de la matière première (le coût d'extraction EC est brutalement augmenté de 50%) à T0+25 ans (soit au début des années 80).

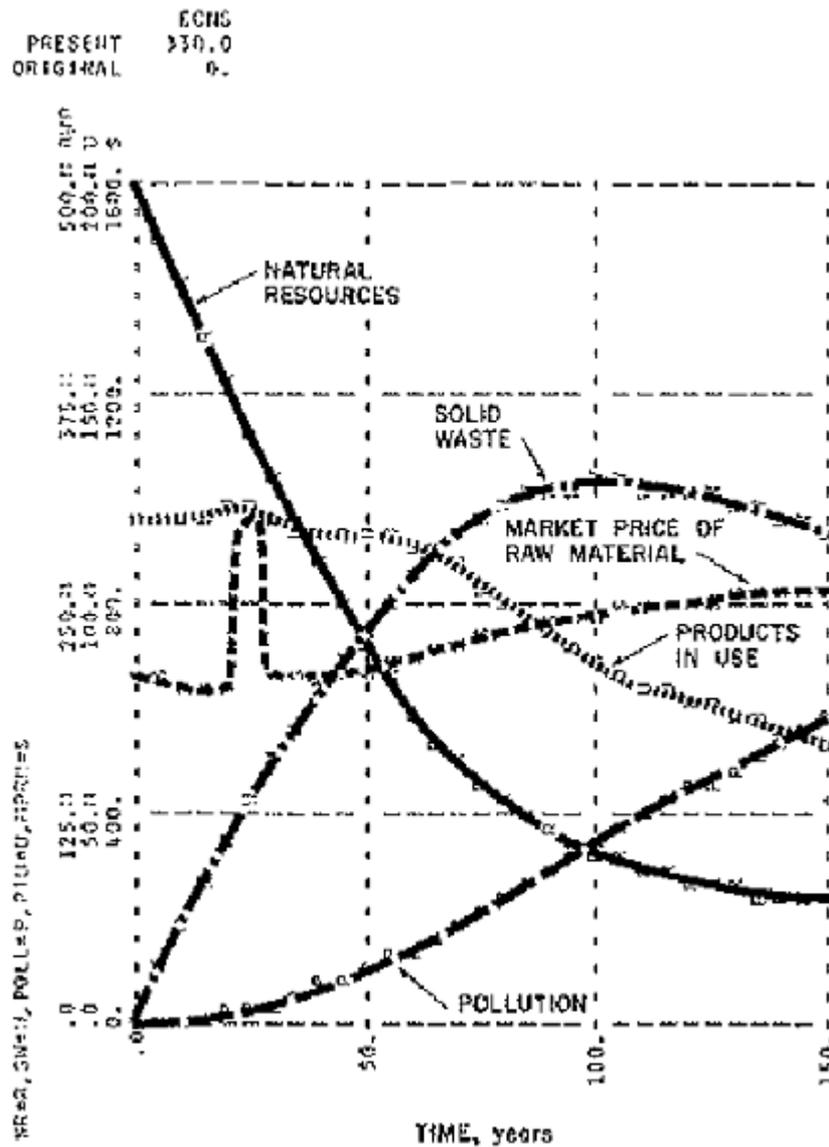


Figure 7- 14 : Run N°3 = effet d'une taxe à 50% sur l'extraction (coût d'extraction augmenté de 50%) à T0+25ans

Comme attendu, le principal effet est de sauvegarder plus de ressources naturelles à la fin du run grâce à une diminution du taux d'extraction *ER*.

Cependant, l'effet global est moins positif que prévu. Car un autre **effet contre-intuitif** apparaît : les marchés répondent très vite à cette augmentation du prix de la matière première sur le marché *MPRM* grâce au taux de recyclage qui augmente vite et grâce à une diminution brutale de la demande dans le même temps. **La pollution et les déchets diminuent un peu**, mais on le paye par **moins de produits en usage (PIU)**.

C'est l'exemple type de **résultat non intuitif** obtenu dans un système dynamique complexe.

- Dans le **run N°4** (Figure 7- 15), le **coût de recyclage RCC** est **réduit de 50%** à T0+25 ans, traduisant l'effet soit d'une subvention au secteur du recyclage, une rupture technologique dans ce domaine ou encore une diminution du coût du travail. Il résulte que le taux de recyclage *RCR* augmente significativement, augmentant ainsi l'offre de matière première, permettant de diminuer les prix et donc faisant croître la demande. La conséquence notable est que la quantité de produits en usage *PIU* est sensiblement plus grande que dans le run standard tandis que la pollution et les déchets sont moins importants. Les profits des « transformateurs » sont importants, mais la matière première *NR* diminue sensiblement aussi rapidement que dans le run standard.

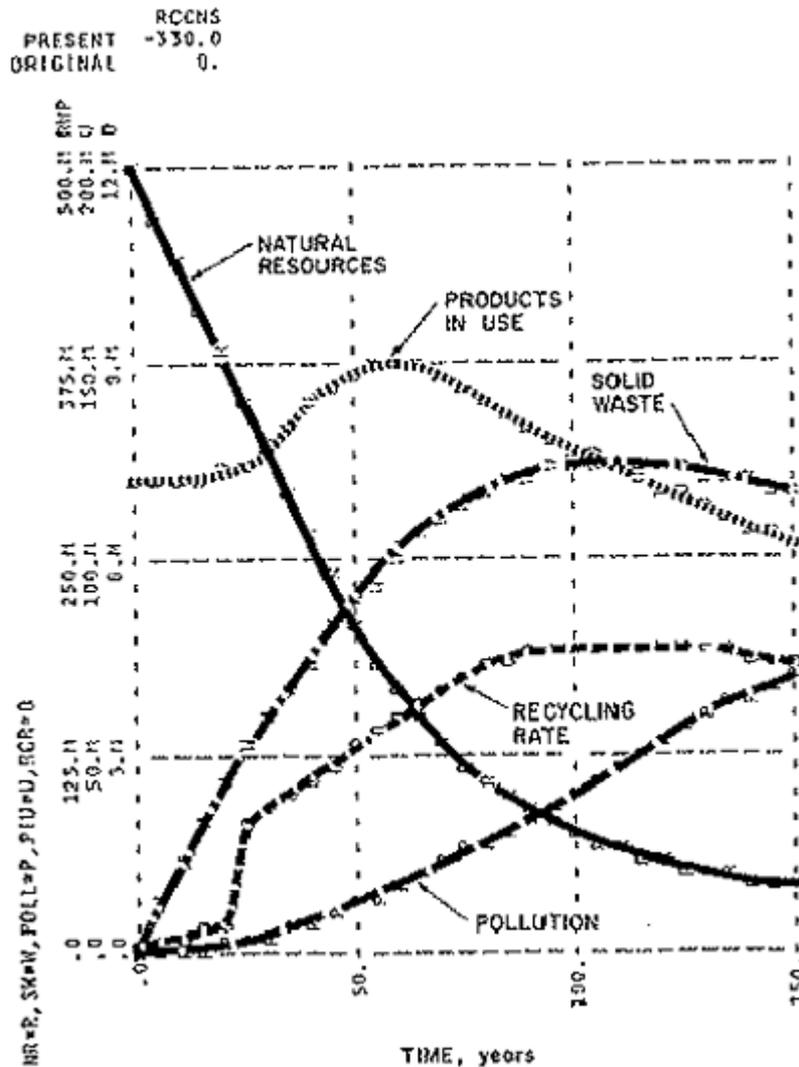


Figure 7- 15 : Run N°4 = effet d'une réduction de 50% du coût du recyclage à T0+25 ans

Il est à noter qu'un résultat similaire a été obtenu en supposant que les produits fabriqués le sont de sorte qu'ils soient plus facilement recyclables : changer la fraction maximale recyclable *MRCF* de 1,5% à 3% permet de doubler la fraction de déchets qui sont recyclés chaque année quel que soit le prix du marché.

Toutefois, comme indiqué plus haut, les ressources naturelles *NR* diminuent sensiblement comme avant. Pour remédier à cela et aussi financer le recyclage, le run N°5 vise à regarder le résultat d'une telle réduction du *RCC* combinée à une taxe de 50% sur l'extraction.

- Dans le **run N°5** (Figure 7- 16), le **coût de recyclage RCC** est donc **réduit de 50%** et une **taxe de 50%** est mise sur **l'extraction** simultanément à T0+25 ans. Il s'ensuit le **meilleur résultat jusqu'alors** : les ressources naturelles sont davantage préservées, les déchets et la pollution sont moindres que dans le run N°4, et les produits en usage sont certes moins nombreux que dans le run précédent, mais restent plus nombreux que dans le run standard.

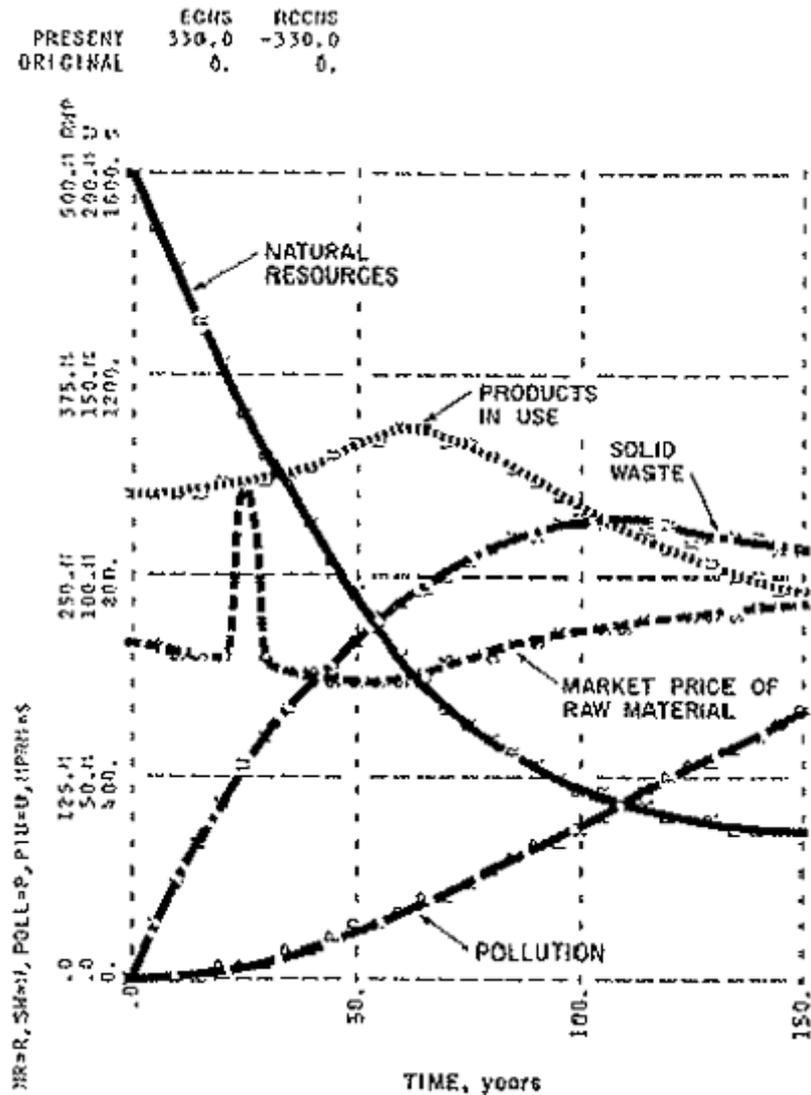


Figure 7- 16 : Run N°5 = effet d'une réduction de 50% du coût du recyclage à T0+25 ans associée à une taxe de 50% sur l'extraction

Il est également fondamental de se rappeler que le succès d'une politique de recyclage dépend de l'existence d'un stock de déchets solides recyclables.

C'est notamment le cas si la constante de temps de « perte définitive » ou « désintégration » des déchets (transformation des déchets en pollution : *DIT* Disintegration Time) est longue.

Par exemple dans les runs précédents, la **durée de désintégration *DIT*** de tous les déchets solides vers la pollution est prise à **200 ans**. Une durée prise à **20 ans** montre que les **politiques précédentes** sont **inefficaces** : les taux de recyclage restent faibles car les

stocks de produits jetés restent faibles, la pollution est importante et le niveau de vie est bas.

Une DIT dépend fortement de l'usage qui est fait de la matière première par la société. Il est en effet plus facile de recycler des tuyaux de cuivre bruts noyés dans des murs que le cuivre utilisé en micro-électronique, cuivre qui peut être considéré presque à coup sûr comme non recyclable.

A ce stade, on peut se demander comment réduire le flux de génération de déchets solides. Comme mentionné en introduction, les 3 solutions sont :

- Réduire le nombre de produits en usage *PIU* (ou *P* d'après la notation introductive).
- Augmenter la durée de vie *L* du produit (ou le rendre réparable plus facilement).
- Réduire la quantité de déchets solides dans chaque produit. Dans l'introduction on

avait dit : « Réduire la fraction *w* de produit perdue (ou recycler le produit, ce qui revient à réduire *w*) ».

- Une solution évidente mais politiquement difficile voire impossible serait de taxer les produits à tel point que leur usage deviendrait quasi-inabordable par les gens. Une simulation a démontré que cette approche (**Approche 1**) pourrait être un succès si une taxe de 20% sur le prix du marché des produits (*MPP*) était introduite. Cette taxe aurait pour effet de faire croître le coût annuel du produit *YCOP*. La simulation a montré que le nombre de **produits en usage *PIU* diminuerait** significativement et du même coup la quantité de déchets produite *SW*, préservant les ressources naturelles *NR* plus longtemps.

- Il y a toutefois une seconde possibilité : le **run N°6** (Figure 7- 16) illustre le succès d'une **deuxième approche** consistant à **augmenter la durée de vie des produits**, par exemple en les concevant de manière à ce qu'ils durent plus longtemps, ou encore en les rendant réparables plus facilement et de façon moins onéreuse. Dans ce run, la « qualité de vie » ou le « standing » -dont l'indicateur est le nombre de produits en cours d'usage *PIU*- augmente très sensiblement du fait de l'augmentation de la durée de vie *PLT* des produits.

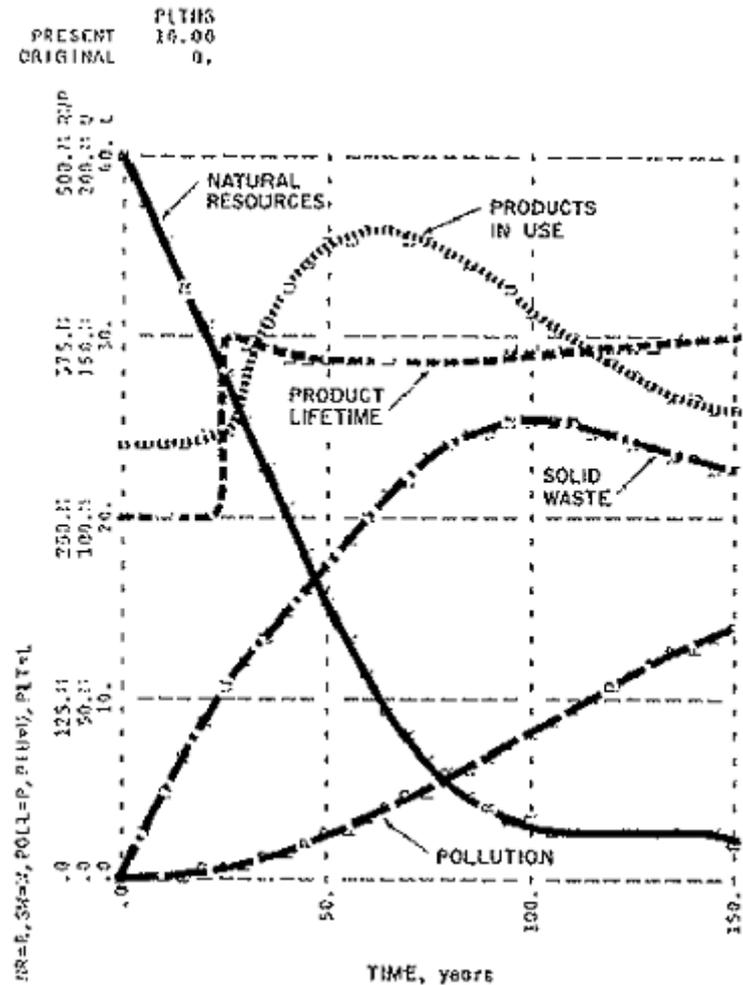


Figure 7- 17 : Run N°6 = effet d'une augmentation de la durée de vie des produits *PLT*

Malgré ce succès, la quantité de ressources naturelles *NR* **diminue drastiquement** et **l'objectif de réduire les déchets n'est pas atteint**. En effet, l'augmentation de la durée de vie *PLT* à T_0+25 ans se traduit tout d'abord par un coût de détention annuel du produit *YCOP* plus faible. Cela engendre une demande plus forte et par conséquent une hausse des coûts des matières brutes *MPRM* sur les marchés. Cette hausse tire peu à peu vers le haut le prix annuel *YCOP*. Mais dans le modèle, cette augmentation n'est pas suffisante pour faire suffisamment concurrence à la diminution du coût de détention annuel des produits lié à l'augmentation de la durée de vie. Et en réponse à cette diminution d'*YCOP*, la durée de vie des produits *PLT* finit par baisser malgré la hausse des premières années après T_0+25 . Si la dépendance entre la durée de vie des produits *PLT* et le coût annuel perçu de possession des produits *YCOP* avait été plus forte, on aurait vu que faire des meilleurs produits serait contrebalancé par une plus grande consommation à chaque fois que le prix baisse.

Les profits réalisés par les producteurs sont très importants à cause de la conjonction prix élevés + demande élevée.

- Enfin, la **troisième approche**, celle qui consiste à réduire la quantité de déchets solides dans chaque produit, est testée dans le **run N°7** (Figure 7- 18). On le fait en réduisant la quantité de matière brute par produit *RMPP* en supposant que cela n’affecte pas la durée de vie *PLT* du produit (cf Figure 7- 2) ni le prix du produit sur le marché *MPP*.

En un mot, ce run simule une décision de supprimer des parties totalement superflues du produit, par exemple des emballages non strictement indispensables. Le **résultat** est très surprenant et **contre-intuitif** – pour le moins !- si on le compare au run standard. En effet, une réduction du taux de déchets de 40% dans chaque produit rebuté **ne conduit pas à une réduction mesurable de la quantité globale de déchets SW**.

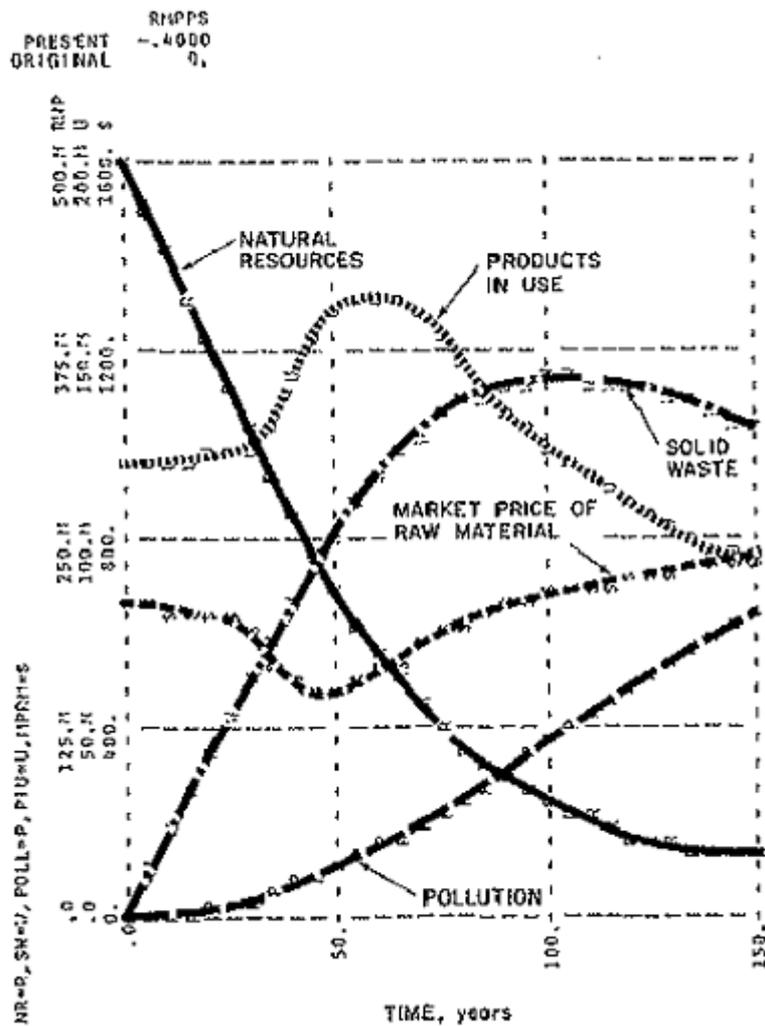


Figure 7- 18 : Run N°7 = effet d’une réduction de la quantité de déchets solides dans chaque produit

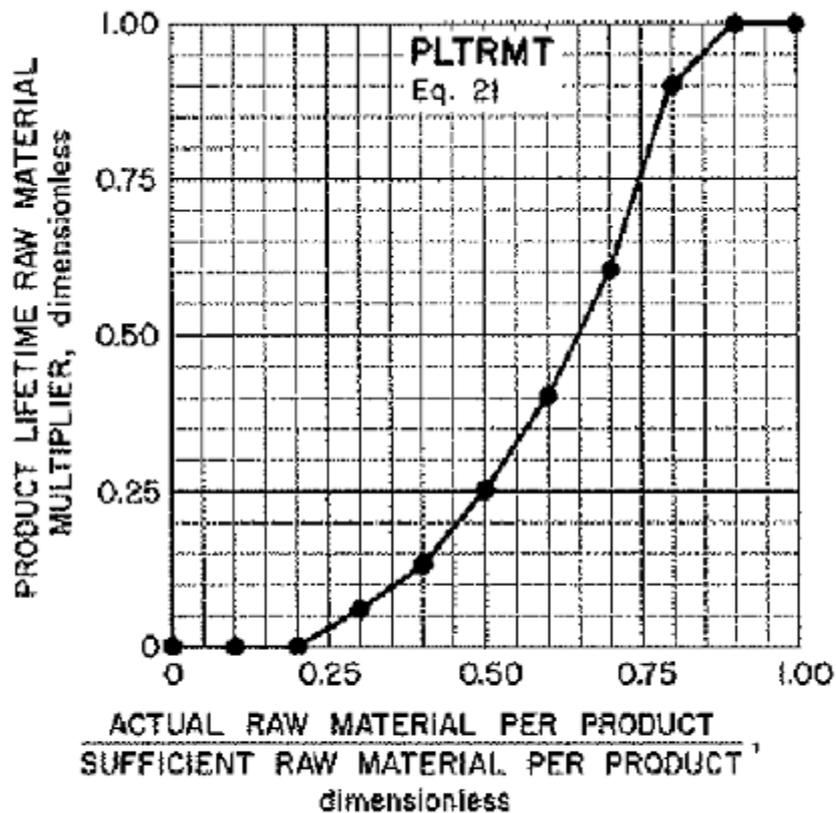
La raison apparait après analyse : la demande de matière brute chute lorsque les « producteurs » (rappel : il s’agit-là en fait des « transformateurs » ie ceux qui transforment la matière brute en produit fini) diminuent leur besoin de matière première de 40%. Il s’ensuit une baisse du coût de la matière brute *MPRM* sur le marché de l’ordre de 30%. Une baisse du prix des produits finit par arriver et incidemment une augmentation de la demande qui conduit à un nombre de produits en usage *PIU* supérieur à ce qu’il était avant cette mesure de

réduction de la quantité de produit perdu par déchet. Cette sur-quantité de produits en usage finit par produire autant de déchets *SW* qu'avant, même si dans chaque produit, il y a moins de déchets.

C'est ce type d'exemple qui illustre la raison d'être et la force de la dynamique des systèmes, notamment pour les systèmes complexes : **le comportement non intuitif du système est mis en évidence**. Ceci permet aussi de mieux comprendre pourquoi des politiques publiques ou des lois -souvent votées avec un bon esprit - échouent.

L'effet de réduire la quantité de matière brute par produit *RMPP* quand cela affecte simultanément le prix du marché du produit *MPP* (qui diminue lorsque la quantité de matériau brut diminue) et la durée de vie du produit *PLT* (qui devient moins grande quand un seuil de quantité minimale nécessaire est franchi à la baisse) a aussi été testé.

La relation « actuelle » ou « réelle » supposée entre la durée de vie du produit et la quantité de matériau brut par produit est donnée sur la Figure 7- 19 ci-dessous qui est similaire à celle de la Figure 7- 2. C'est cette relation qui a été utilisée dans tous les runs précédents.



The dependence of product lifetime on the amount of raw material per product

Figure 7- 19 : relation entre la durée de vie du produit et la quantité de matériau brut par produit. Cette relation est similaire à celle de la Figure 7- 2.

Ici, on a artificiellement modifié cette relation pour que le rapport

$$\frac{w}{L} = \frac{\text{quantité de matériau brut par produit}}{\text{durée de vie}} = \frac{RMPP}{PLT}$$

Eq. 9

vale respectivement 0.9, 1 ou 2 fois le rapport initial.

Ces exemples de trois valeurs typiques sont celles pour lesquelles respectivement la décroissance de la durée de vie *PLT* est *a)* plus grande, *b)* égale et *c)* plus petite que celle de la décroissance de la quantité de matériau brut par produit *RMPP*.

Les simulations numériques ont été effectuées avec ces trois hypothèses successives et ont été comparées au run standard de la

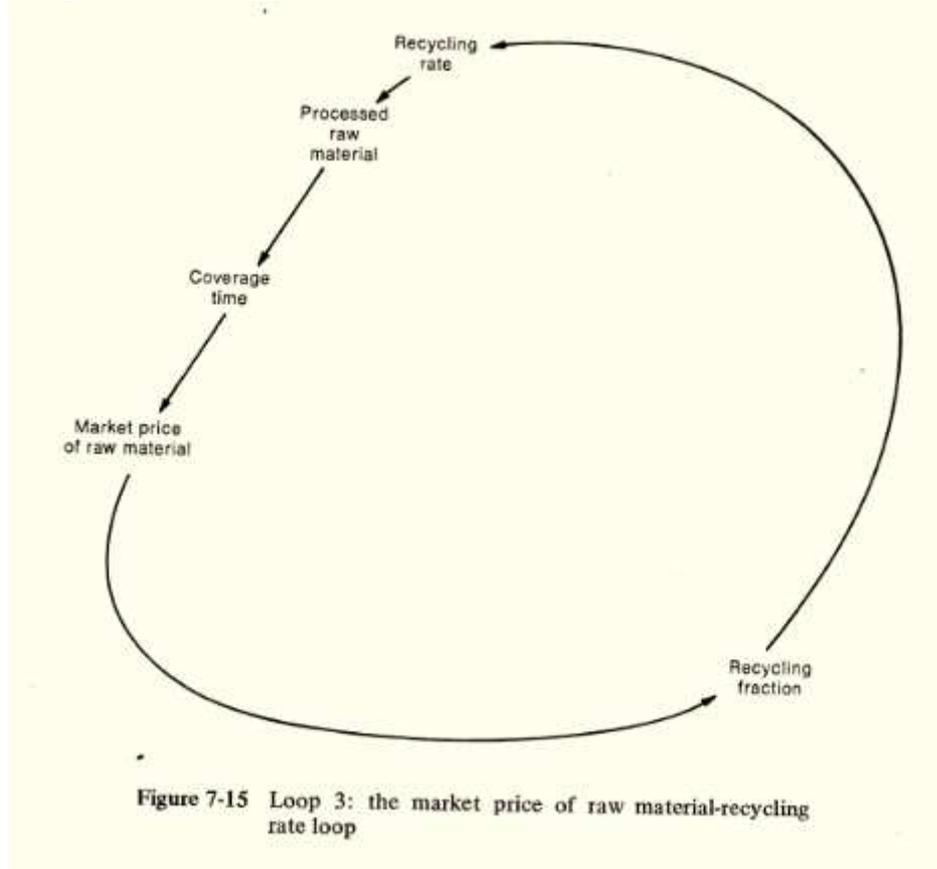


Figure 7- 5 page 14.

Il apparaît rapidement que seul le cas *c)* présente un avantage par rapport au cas standard et que cet avantage est essentiellement une augmentation du nombre de produits en cours d'usage *PIU*.

Cependant, ni la pollution *POLL* ni la quantité de déchets *SW* ne décroissent de façon notable par rapport au cas standard, ce qui est une surprise contraire à nos attentes (mais qui n'est pas une surprise si l'on revient à l'équation *Eq. 1* page 4).

Ceci se produit parce que, au fur et à mesure que les produits deviennent moins chers (car ils comportent moins de matériau brut), la demande augmente. La même quantité de déchets est donc générée même si le taux de déchet par objet rebuté est plus bas que dans le scénario standard.

Dans les deux autres cas *a)* et *b)*, se succèdent d'abord une courte période pendant laquelle le nombre de produits en cours d'usage *PIU* augmente (forte demande causée par des produits moins chers avant que les gens ne réalisent que la durée de vie est également plus faible) suivie d'une période de déclin du nombre de produits en cours d'usage *PIU* pendant laquelle

la pollution *POLL* et la quantité de déchets *SW* augmentent (à cause de la durée de vie des produits devenue plus faible). La situation est particulièrement grave dans le cas *a*) quand la réduction de la durée de vie des produits *PLT* est telle que le coût annuel de détention du produit *YCOP* grimpe en flèche, alors même que le prix du marché des matériaux bruts *MPRM* décroît.

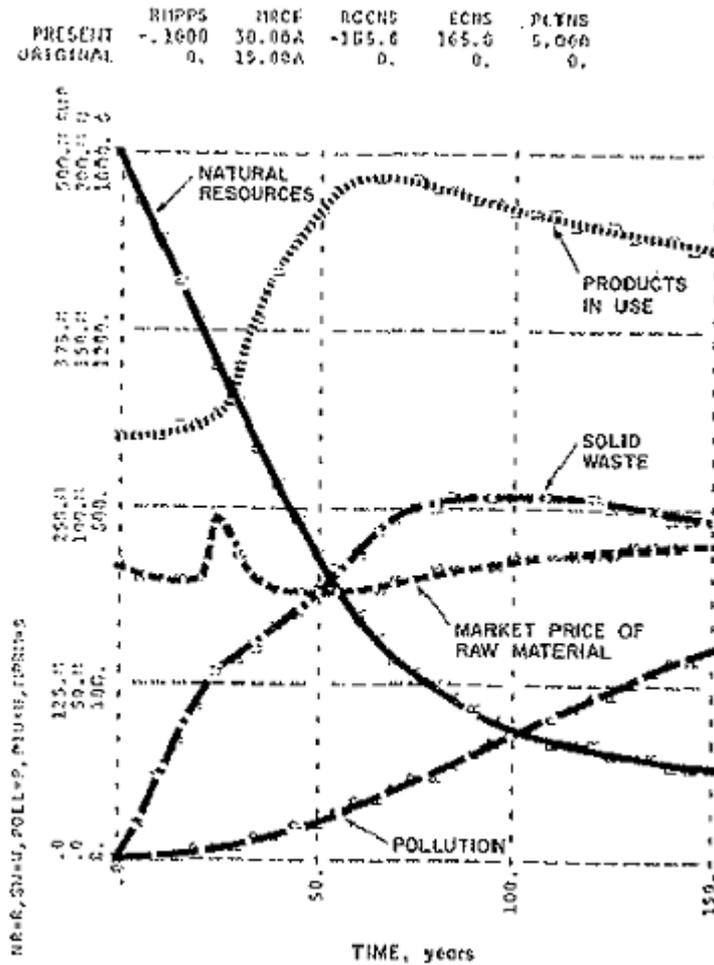
En conséquence, il semble que la réduction de quantité de matériau brut par produit *RMPP* soit à envisager uniquement si cela conduit à une baisse sous-linéaire que celle de la réduction de durée de vie *PLT* (ce qui revient à chercher le point optimum de la courbe de la figure 7-3b page 6 d'ailleurs).

Une solution : quand les « contre-mesures » peuvent être efficaces.

On pourrait être tenté de croire à ce stade que tout est perdu et que la quantité de déchets ne peut être limitée.

Pour montrer que ce pessimisme n'est pas nécessaire, on illustre par le run N°8 ci-dessous les résultats d'une politique conduisant à un bon « niveau de vie² » (dont l'indicateur ici est toujours le *PIU*), à une relativement faible quantité de déchets (*SW*) et de pollution (*POLL*), et des ressources naturelles (*NR*) préservées.

▪ **Run N°8 (Figure 7- 20) : une solution**



Run 8: how to beat the system

Figure 7- 20 : Run N°8 = une combinaison astucieuse de politiques. C'est : la politique « plus fort que les déchets».

² On rappelle toutefois ici que les exemples sont ceux du matériau « cuivre » et ne couvrent donc aucunement les besoins humains. Le « niveau de vie » dont il est question ici est davantage le marqueur de la disponibilité et de l'accessibilité pour les hommes de ce matériau. Comme l'indiquent les auteurs, en remplaçant les données d'entrée par d'autres valeurs, on pourrait traiter d'autres matériaux.

Quelle est donc la politique qui apporte de tels résultats ? C'est une combinaison simultanée des politiques précédentes pour lesquelles nous avons trouvé des avantages ponctuels :

- Une taxe de 25% sur l'extraction.
- Une subvention de 25% sur le recyclage.
- Une augmentation de 25% de la durée de vie des produits (*PLT*).
- Un doublement de la fraction maximale recyclable.
- Une réduction de la quantité de matériau brut dans chaque produit de sorte que $\frac{w}{L}$ passe de 1 à 0,9³.

La combinaison de ces politiques (à T0+25 ans) crée les conditions qui permettent une certaine soutenabilité illustrée sur la Figure 7- 20. Ce run montre donc **qu'il est possible d'améliorer le comportement du système** en appliquant des politiques coordonnées plutôt qu'une seule politique à la fois.

Discussion : les mises en œuvre concrètes et pratiques de cette étude.

La question est alors : comment implémenter de telles « solutions » dans le monde réel ?

Taxer les extractions et subventionner le recyclage sont des mesures facilement « promulgables » ou implémentables.

Augmenter la fraction maximale recyclable, réduire la quantité de matériau brut par produit tout en augmentant la durée de vie du produit sont plus difficiles à réaliser.

En fait, ce qui manque dans les boucles actuelles du marché, c'est la boucle de rétroaction liée au **coût de l'élimination des produits**. Celle-ci pourrait être le chaînon manquant ou plutôt le « potentiomètre » entre le taux de génération de déchets et la forte demande des gens pour un produit.

Il faudrait que cette boucle soit mise en place de sorte qu'elle incite le fabricant à concevoir des produits qui créent le moins de problèmes possibles à leur élimination en tant que déchets. En d'autres termes, cette boucle devrait conduire à des **produits facilement recyclables**, qui contiendraient **peu de déchets** potentiels et qui auraient une **durée de vie longue**.

Heureusement, cette boucle est facile à trouver. Elle consiste en **une taxe** sur les produits⁴ qui serait **proportionnelle au ratio de déchet** dans le produit **divisée par la durée de vie** du produit $\frac{w}{L}$.

Ici, w est la quantité de déchets qui atteint effectivement la décharge. En d'autres termes, c'est la quantité de matière brute que contient le produit moins la quantité qui est recyclée.

³ On rappelle au paragraphe précédent que cette valeur est celle pour laquelle la décroissance de la durée de vie *PLT* est plus grande que celle de la décroissance de la quantité de matériau brut par produit *RMPP*.

⁴ Et donc payée in fine par le consommateur

Une telle taxe devrait être suffisamment incitative pour d'une part faire décroître la quantité de matériau brute dans chaque produit tout en concevant celui-ci de sorte qu'il soit recyclable facilement. Ainsi, on évite le problème lié au producteur qui ferait diminuer la quantité de matériau brut en dessous du seuil en deçà duquel la durée de vie s'écroule (cf point C de la Figure 7- 2). Au contraire, **la durée de vie devient un critère fondamental**, ce qui inciterait les fabricants à utiliser tous les moyens possibles pour ce faire : depuis une meilleure conception jusque faire des produits facilement réutilisables, réparables et/ou recyclables.

La durée de vie L (ou PLT dans les runs) pourrait être établie sur une base statistique par des « bureaux d'audit » indépendants, de même que pour les quantités de matériau brut, de la fraction perdue w et le caractère recyclable ou non des sous-parties du produit.

De tels organismes seraient à même de mettre des taxes très importantes pour des déchets particulièrement dangereux ou gênants.

Cette taxe proportionnelle à $\frac{w}{L}$ est donc doublement intéressante : de par sa simplicité (relative) de mise en œuvre pratique –donc de son caractère opérationnel rapidement si elle est décidée sur une base politique- et de son efficacité théorique.

Policy Proposal	Equivalent Parameter Change
Remove depletion allowances in mining industries	Increase extraction cost EC
Remove deductions for cost of exploration	Increase extraction cost EC
Remove capital-gains tax treatment in mining industries	Increase extraction cost EC
Make freight rates as low for scrap as for virgin raw material	Decrease recycling cost RCC
Remove federal government stipulations that prohibit use of anything but virgin material	Decrease recycling cost RCC (through the economies of scale which larger demand makes possible)
Make people sort their own wastes in their homes	Decrease recycling cost RCC
Prohibit nonreturnable containers	Increase product lifetime PLT (for the substitute returnable containers)
Reduce packaging	Reduce raw material per product RMPP.

Possible policies intended to solve the natural resources-solid waste problem

Quelle est l'urgence du problème (dans le cas simulé) ?

Dans tous les runs effectués et décrits précédemment, l'hypothèse de « durée de désintégration » (*DIT*) des déchets solides *SW* a été prise égale à 200 ans.

Avec cette hypothèse (et toutes les autres), on a vu que les hommes avaient environ **40 ans** avant d'être vraiment **confrontés au problème** simulé i.e. celui des déchets de cuivre. C'est en effet la durée typique (d'après le run standard : cf. Figure 7- 12) au-delà de laquelle le « niveau de vie », c'est-à-dire le nombre de produits en cours d'usage *PIU*, commence à s'écrouler à cause du manque de ressources naturelles *NR*.

Il faut se rappeler que les années 80 correspondent approximativement à T_0+25 ans dans les runs illustrés et décrits précédemment.

Mais si l'on est plus pragmatique et que l'on regarde en détail le cycle du cuivre, la façon dont les déchets de cuivre sont soit enterrés, jetés ou encore dispersés dans les rivières et océans, on peut supposer que la disponibilité des rebuts *SW* pour recyclage est plus proche de 20 ans que de 200 ans.

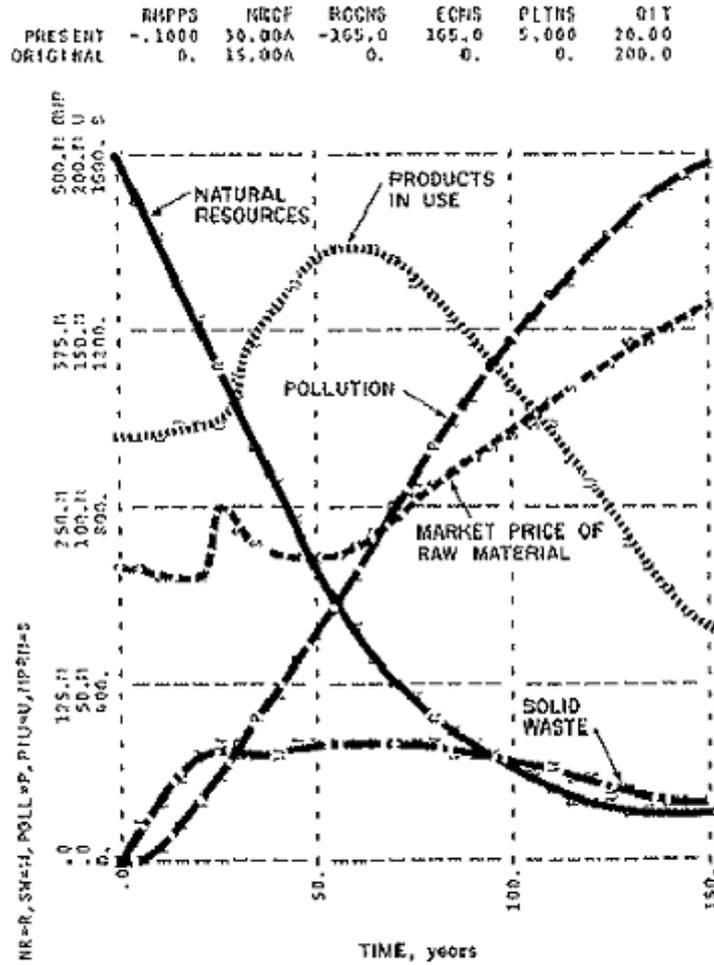
Le **run N°9** illustré sur la Figure 7- 21 étudie le cas du run N°8 précédent rejoué avec une durée de désintégration *DIT* de 20 ans au lieu de 200 ans.

Dans ce cas, on peut considérer que le succès est plus relatif, même si toujours au rendez-vous pour au moins 2 aspects : d'une part, la quantité de produits en cours d'usages *PIU* reste élevée pendant un temps relativement long (même si la décroissance est ensuite d'autant plus brutale) ; d'autre part, la quantité de déchets solides *SW* reste très faible.

En revanche, la pollution *POLL* devient extrême et les ressources naturelles *NR* ne sont pas du tout préservées.

Si en revanche, on décide d'attendre le début de la décroissance du nombre de produits en cours d'usage (par exemple après T_0+50 ans dans le scénario standard : cf. Figure 7- 12 page 28) pour implémenter la politique « plus fort que les déchets », le résultat devient critique.

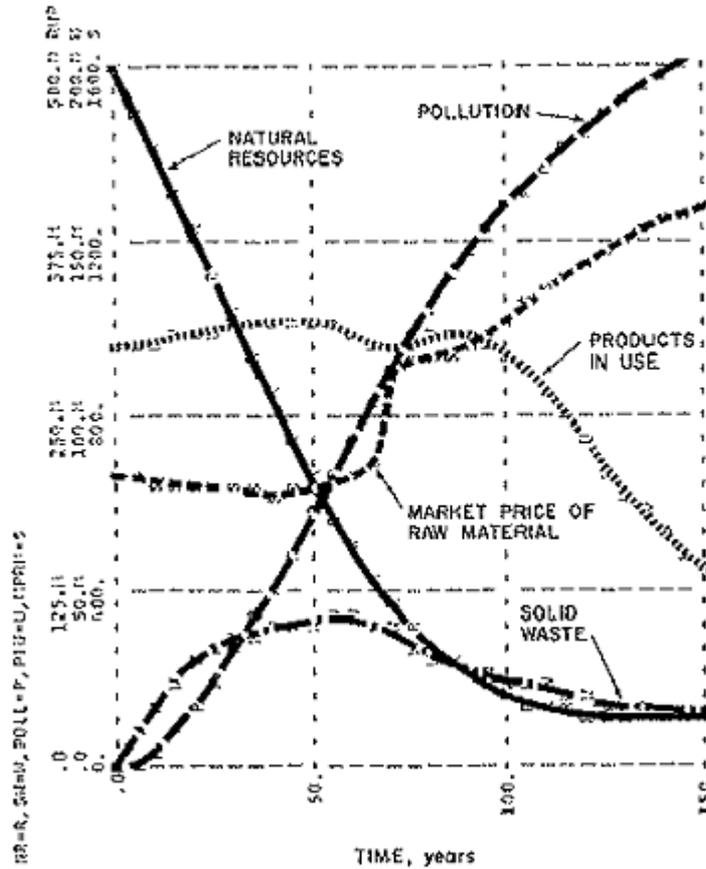
On peut observer cet échec sur le **run N°10** de la Figure 7- 22. Le retard accumulé avant décision de mettre en œuvre les politiques adéquates amène à l'échec de celles-ci.



Run 9: the continuing success of the policy in Run 8 when the disintegration time is 20 years

Figure 7- 21 : Run N°9 = politique « plus fort que les déchets » rejouée à T0+25 ans avec une durée de désintégration de 20 ans au lieu de 200 ans.

	PIPPS	INCP	RCCRS	FCRS	PLTIS	DET	ACCNT	ÉCNE
PRESENT	-1.1000	30.000	-165.0	165.0	5.000	20.00	70.00	70.00
ORIGINAL	0.	15.000	0.	0.	0.	200.0	25.00	25.00
	PLINT	MAPPE						
PRESENT	70.00	70.00						
ORIGINAL	25.00	25.00						



Run 10: the failure of the formerly successful policy when implemented too late (in year 70)

Figure 7- 22 : Run N°10 = politique « plus fort que les déchets » rejouée à T0+70ans avec une durée de désintégration de 20 ans au lieu de 200 ans.

Une conclusion fondamentale s'impose: dans le système simulé de génération de déchets, l'application de politiques volontaristes ne pourra connaître le succès que si celles-ci sont mises en œuvre **plusieurs années voire plusieurs décennies AVANT le déclin**. Il est trop tard pour réagir et activer des contre-mesures une fois que le déclin est enclenché.

A qui aura encore le courage de le lire, on rappelle ici que tous les runs ont été effectués en supposant une population constante et un revenu par habitant également constant. En fait, ces deux grandeurs croissent de façon exponentielle –avec comme résultat une consommation de matière première en hausse de 2.5% par an en moyenne sur les 100 dernières années-, accentuant ainsi la pression sur les ressources de l'ordre de 300% sur 40 ans, et donc l'urgence du problème.

Application pratique à la France de 2013

A titre de comparaison par rapport à la Figure 7- 1, la France a généré en 2012 environ 770 millions de tonnes de déchets solides en tout (soit quatre fois moins que les USA en 1967) dont une trentaine de millions de tonnes de déchets urbains (déchets ménagers : dix fois moins que les USA en 1967) et 280 millions de tonnes de déchets minéraux (contre 1000 millions aux USA en 1967) et environ 480 millions de tonnes de déchets agricoles : quatre fois moins que les USA en 1967).

Un moyen de tester la pertinence de cette approche par la dynamique des systèmes est le suivant :

- ✓ Choisir un cas applicatif : un matériau brut et l'ensemble des produits dérivés associés.
- ✓ Modéliser ce cas « d'école » à l'aide de simulations numériques en dynamique des systèmes et estimer le niveau adéquat des taxes et subventions (sur « l'extraction », le recyclage et la durée de vie : cf paragraphe précédent).
- ✓ Appliquer ces taxes et subventions. Pour la taxe proportionnelle à w/L , remplacer par exemple la TVA existante par cette taxe. Un moyen d'ajustement du niveau de la nouvelle taxe consiste à estimer la rentrée d'argent pour l'Etat (sur une base annuelle par exemple) afin que celle-ci soit du même ordre de grandeur que celle apportée par l'ex-TVA.

Difficulté : le bon sens voudrait que l'on adopte la démarche qui suit pour étudier l'impact d'une telle politique. Cette démarche consisterait à attendre un nombre d'années suffisant avant d'évaluer la pertinence de cette approche et de l'étendre à d'autres secteurs. Toutefois, les résultats des simulations montrent que la constante de temps est de l'ordre de 50 ans. Une telle approche sur la durée n'est donc pas envisageable.

Il est donc essentiel que la simulation numérique soit utilisée en complément du suivi empirique pour montrer les inflexions ou « signaux faibles » permettant de savoir dans des temps plus courts (5 à 10 ans typiquement par exemple) si cette politique « va dans le bon sens » ou non.

Références :

Réf. 1 – “Toward Global Equilibrium : Collected Papers” – Ed. by Dennis & Donella Meadows. 1974