

Annexe 1 Code informatique du modèle STARTS (chapitre 1, section 3)

Le modèle STARTS (Lecocq et Hourcade, 1997) est un modèle d'optimisation intertemporelle des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans un monde comprenant un agent et un secteur. Les différentes versions de ce modèle ont été implémentées informatiquement sous GAMS (*General Algebraic Modeling System*) dont une description succincte est proposée dans la première section. Les codes GAMS des versions coûts efficacité, coûts bénéfiques avec dommages linéaires et avec dommages non linéaires STARTS sont ensuite présentés dans les trois sections suivantes.

1. Description succincte de GAMS

GAMS constitue un véritable langage de programmation compilé dédié à la résolution de problèmes d'optimisations. Dans ce logiciel, les modèles sont d'abord écrits dans un langage dédié relativement naturel, proche dans sa syntaxe du langage Pascal (cf. les listings proposés ci-dessous). Le logiciel a ensuite pour tâche de les compiler et de confier l'exécution de l'optimisation elle-même à un sous-programme dédié (appelé « solveur »). Pour les simulations, nous avons utilisés les solveurs CONOPT et MINOS.

Le solveur GAMS/CONOPT est un outil spécifiquement construit pour résoudre de problèmes d'optimisation non linéaires à grand nombre de variables de la forme (1)-(3) suivante, où f et g peuvent être des fonctions non linéaires. L'algorithme utilisé est l'algorithme GRG (*Generalized Reduced Gradient*) proposé pour la première fois par Abadie et Carpentier (1969) puis amélioré pour tenir compte d'un grand nombre de variables (Drud, 1985, 1994).

$$\text{Min } f(x) \quad (1)$$

$$\text{s.c. } \quad g(x) = b \quad (2)$$

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \quad (3)$$

Le programme GAMS/MINOS est construit pour résoudre des problèmes de la forme (4)-(7) suivante. L'algorithme utilisé est un algorithme de lagrangien projeté (Robinson, 1972, Murtagh et Saunders, 1982) qui ramène tout problème à contraintes non linéaires (i.e. f non linéaire) à une série de résolutions de problèmes non linéaires à contraintes linéaires (i.e. f linéaire) résolu avec un algorithme de gradient réduit (Culioli, 1984).

$$\text{Min } F(x) + c^T \cdot x + d^T \cdot y \quad (4)$$

$$\text{s.c. } f(x) + A_1 \cdot y < b_1 \quad (5)$$

$$A_2 \cdot x + A_3 \cdot y < b_2 \quad (6)$$

$$x_{\min} \leq x, y \leq x_{\max} \quad (7)$$

Les problèmes d'optimisation posés par les différents modèles de la famille STARTS peuvent être interprétés aussi bien comme des problèmes de la famille (1)-(3) et (4)-(7). Il suffit pour cela de changer la nature des fonctions objectifs. Notons que cette opération de traduction du modèle sous forme de listing GAMS en problème utilisable par l'un ou l'autre des solveurs est effectuée directement par le logiciel, l'utilisateur se bornant à indiquer le solveur qu'il souhaite utiliser.

2. STARTS coûts efficacité

* Modele STARTS - Cout efficacite

* -----

* Date de finition 06/06/97

* -----

*

* La version presentee ici a pour objectif de maximiser une fonction d'utilite sous
* contrainte de non depassement d'une concentration atmospherique cible en CO2.

Sets t /1990,2000,2010,2020,2030,2040,2050,2060,2070,2080,
2090,2100,2110,2120,2130,2140,2150,2160,2170,2180,
2190,2200,2210,2220,2230,2240,2250,2260,2270,2280,
2290,2300/

tfirst(t) premiere periode

tlast(t) derniere periode;

Scalars	L0	population initiale	/5.3/
	txcrpop	taux de croissance (population+progres technique)	/0.02/
	K0	capital initial (G\$)	/95/
	C0	consommation initiale (G\$)	/14/
	I0	investissement initial (G\$)	/4/
	alpha	coefficient de K dans la fonction de production	/0.4233/
	txdpr	taux de depreciation du capital global	/0.03/
	Eb0	emissions initiales	/6/
	dcr	decrochement emissions - production	/1.228038/
	txdcr	taux de variation du decrochement emissions - production	/0.00667595/
	txabs	taux d'absorption des emissions dans l'atmosphere	/0.38/
	txdsp	taux de disparition du CO2 dans les puits	/0.0083/
	M0	concentration initiale en CO2	/354/
	Minf	concentration preindustrielle en CO2	/278/
	Mcible	plafond de concentration en CO2	/450/
	tarc	taux annuel de renouvellement du capital emetteur	/0.03/
	prglim	limite du progres technique autonome	/0.25/
	prgtx	taux de croissance du progres technique autonome sur A	/0.015/
	epsilon	terme technique (pour approcher le max)	/0.01/
	BK	cout de la backstop technology (M\$ par t)	/1.1/
	beta	parametre de la fonction d'utilite de Chichi	/0.1/
	periode	periode (ans)	/10/
	delta	taux de preference pure pour le present	/0.03/;

Parameters	lambda(t)	progres technique
	L(t)	population
	discount(t)	facteur d'actualisation
	decr(t)	decrochement emissions - croissance
	Ed(t)	emissions dues a la deforestation;

tfirst(t) = yes\$(ord(t) eq 1);

tlast(t) = yes\$(ord(t) eq card(t));

lambda(t) = prglim + (1-prglim)*exp(-prgtx*(ord(t)-1)*periode);

L(t) = L0 * (1 + txcrpop)**((ord(t)-1)*periode);

discount(t) = 1 / (1 + delta)**((ord(t)-1)*periode);

discount(tlast) = discount(tlast)/delta;

* discount(t) = exp(-delta*log(ord(t)));

decr(t) = dcr*exp(-txdcr*((ord(t)-1)*periode));

loop(t,

if(ord(t)<=21,

```

        Ed(t) = 1.4-((0.2/3)*(ord(t)-1));
    else
    Ed(t) = 0;
);
);

```

Variables	K(t)	capital
	C(t)	consommation
	I(t)	investissement
	Eb(t)	emissions de base
	acc(t)	acceleration
	param(t)	parametre acceleration
	A(t)	abatement
	Ca(t)	cout de reduction des emissions
	M(t)	concentration
	saving(t)	taux d'epargne
	U	utilite totale;

```

A.lo(t) = 0;
K.lo(t) = K0;
C.lo(t) = C0;
I.lo(t) = I0/2;
M.lo(t) = M0;
Ca.lo(t) = 0;
Eb.lo(t) = Eb0;
param.lo(t) = -9;
acc.lo(t) = 0;
acc.fx(tfirst) = 1;

```

```

A.up(t) = 30;
I.up(t) = 1000000;
M.up(t) = Mcible;
param.up(t) = +9;
acc.up(t) = 9;

```

```

K.fx(tfirst) = K0;
M.fx(tfirst) = M0;
M.fx(tlast) = Mcible;
A.fx(tfirst) = 0;

```

Equations	eeb0(t)	emissions initiales
	eeb(t)	emissions de base
	pparam(t)	definition du parametre de l'acceleration
	aacc(t)	valeur de l'acceleration
	cca(t)	cout de l'abatement
	cc(t)	repartition de la production
	kk(t)	equation d'evolution du capital
	mm(t)	equation d'evolution de la concentration
	contrainte(t)	contrainte sur la concentration
	tc(t)	condition finale
	ssaving(t)	calcul du taux d'epargne
	utilite	fonction objectif (utilitariste ou de Chichilnisky);

```

eeb0(tfirst) .. Eb(tfirst) = e= Eb0;
eeb(t+1) .. Eb(t+1) = e= Eb0*(1 + decr(t+1)* ( log( (C(t+1)+I(t+1)) / (C0+I0) ) / (ord(t)*periode) )
) ** (ord(t)*periode);
pparam(t+1) .. param(t+1) = e= (A(t+1)-A(t))/(Eb(t+1)*tarc*periode);
aacc(t+1) .. acc(t+1) = e= 0.5*(sqrt(sqrt(param(t+1)-1)+sqrt(epsilon))+param(t+1))+0.5;

```

Annexe 1

```

cca(t)      ..      Ca(t) =e= 1/3 * A(t)**3/Eb(t)**2 * lambda(t) * acc(t) * BK;
mm(t+1)    ..      M(t+1) =e= M(t) + periode * (txabs*(Eb(t)+Ed(t)-A(t))-txdsp*(M(t)-Minf));

contrainte(t)  ..      M(t) =l= Mcible;

tc(tlast)   ..      K(tlast) =g= 2*K0;
cc(t)       ..      (K(t)**alpha)*(L(t)**(1-alpha)) =e= C(t) + I(t) + Ca(t);
kk(t+1)    ..      K(t+1) =e= K(t) + periode * (I(t) - txdpr * K(t));
utilite     ..      U =e= sum(t, periode*log(C(t))*discount(t));
ssaving(t)  ..      saving(t) =e= I(t) /(C(t) + I(t) + Ca(t));

```

Model starts /all/;

option nlp=conopt;

Solve starts maximizing U using nlp;

Display C.l, K.l, I.l, saving.l, Eb.l, A.l, Ca.l, M.l, U.l, decr;

```

file result /c:\gams\result.txt/ ;
put result ;
put @3,'t',@15,'K',@30,'I',@45,'C',@60,'saving',@75,'Ca'/;
loop(t,put @3,t.tl,@15,K.l(t),@30,I.l(t),@45,C.l(t),@60,saving.l(t),@75,Ca.l(t)/ );
put /;
put @3,'t',@15,'Eb',@30,'A',@45,'M'/;
loop(t,put @3,t.tl,@15,Eb.l(t),@30,A.l(t),@45,M.l(t)/ );
put /;

```

3. STARTS coûts bénéfiques – dommages linéaires

```

* Modele STARTS couts benefices lineaires
* -----
* Date de depart :09:43 12/06/97
* -----
* A servi pour calibrer les sommes cumulees des emissions
* Sert pour realiser les simulations pour le cas lineaire
* On fait tourner le modele avec une stabilisation a 2230
* On choisit pour le dommage : 5% pour 450 ppm
*                               3% pour 550 ppm
*                               1,5% pour 650 ppm
* Ces dommages donnent grosso modo le meme total cumule des emissions en 2200
* que dans le cas cout efficacite

```

```

Sets      t      /1990,2000,2010,2020,2030,2040,2050,2060,2070,2080,
              2090,2100,2110,2120,2130,2140,2150,2160,2170,2180,
              2190,2200,2210,2220,2230,2240,2250,2260,2270,2280,
              2290,2300/

```

```

tfirst(t) premiere periode
tlast(t)  derniere periode;

```

```

Scalars  L0      population initiale      /5.3/
          txcrpop  taux de croissance (population+progres technique) /0.02/
          K0      capital initial (G$)      /95/
          C0      consommation initiale (G$) /14/
          I0      investissement initial (G$) /4/
          alpha   coefficient de K dans la fonction de production /0.4233/
          txdpr   taux de depreciation du capital global /0.03/
          Eb0     emissions initiales      /6/

```

dcr	decrochement emissions - production	/1.228038/
txdcr	taux de variation du decrochement emissions – production	/0.00667595/
txabs	taux d'absorption des emissions dans l'atmosphere	/0.38/
txdsp	taux de disparition du CO2 dans les puits	/0.0083/
M0	concentration initiale en CO2	/354/
Minf	concentration preindustrielle en CO2	/278/
tarc	taux annuel de renouvellement du capital emetteur	/0.03/
prglim	limite du progres technique autonome	/0.25/
prgtx	taux de croissance du progres technique autonome sur A	/0.015/
epsilon	terme technique (pour approcher le max)	/0.01/
BK	cout de la backstop technology (M\$ par t)	/1.1/
dtwice	dommages calcules pour M=2fois Minf	/0.0501/
periode	periode (ans)	/10/
delta	taux de preference pure pour le present	/0.03/;

Parameters	lambda(t)	progres technique
	L(t)	population
	discount(t)	facteur d'actualisation
	decr(t)	decrochement emissions - croissance
	Ed(t)	emissions dues a la deforestation;

```

tfirst(t) = yes$(ord(t) eq 1);
tlast(t) = yes$(ord(t) eq card(t));
lambda(t) = prglim + (1-prglim)*exp(-prgtx*(ord(t)-1)*periode);
L(t) = L0 * (1 + txcrpop)**((ord(t)-1)*periode);
discount(t) = 1 / (1 + delta)**((ord(t)-1)*periode);
discount(tlast) = discount(tlast)/delta;
* discount(t) = exp(-delta*log(ord(t)));
decr(t) = dcr*exp(-txdcr*((ord(t)-1)*periode));

```

```

loop(t,
  if(ord(t)<=21,
    Ed(t) = 1.4-((0.2/3)*(ord(t)-1));
  else
    Ed(t) = 0;
  );
);

```

Variables	K(t)	capital
	C(t)	consommation
	I(t)	investissement
	Eb(t)	emissions de base
	dom(t)	dommages dus a l'effet de serre
	acc(t)	acceleration
	param(t)	parametre acceleration
	A(t)	abatement
	Ca(t)	cout de reduction des emissions
	M(t)	concentration
	saving(t)	taux d'epargne
	cumul	somme cumulee des emissions
	U	utilite totale;

```

A.lo(t) = 0;
K.lo(t) = K0;
dom.lo(t) = 0;
C.lo(t) = C0;
I.lo(t) = 0;
M.lo(t) = M0;

```

Annexe 1

Ca.lo(t) = 0;
 Eb.lo(t) = Eb0;
 param.lo(t) = -9;
 acc.lo(t) = 0;

A.up(t) = 30;
 I.up(t) = 10000;
 M.up(t) = 1000;
 param.up(t) = +9;
 acc.up(t) = 9;
 dom.up(t) = 0.9;

K.fx(tfirst) = K0;
 M.fx(tfirst) = M0;
 A.fx(tfirst) = 0;
 dom.fx(tfirst) = 0;
 dom.fx('2000') = 0;
 acc.fx(tfirst) = 1;

A.fx('2000') = 0;
 A.fx('2010') = 0;

Equations	eeb0(t)	emissions initiales
	eeb(t)	emissions de base
	pparam(t)	definition du parametre de l'acceleration
	aacc(t)	valeur de l'acceleration
	cca(t)	cout de l'abatement
	cc(t)	repartition de la production
	kk(t)	equation d'evolution du capital
	dommage(t)	valeur des dommages dus a l'effet de serre
	stabil(t)	stabilisation de M a partir de 2230
	mm(t)	equation d'evolution de la concentration
	tc(t)	condition finale 2
	posit(t)	limitation de l'abatement
	croiss(t)	le capital augmente
	ssaving(t)	calcul du taux d'epargne
	tc2(t)	controle de l'investissement finale
	ccumul	limite le cumul des emission
	utilite	fonction objectif;

eeb0(tfirst) .. Eb(tfirst) =e= Eb0;
 eeb(t+1) .. Eb(t+1) =e= Eb0*(1+decr(t+1)*(log((C(t+1)+I(t+1))/(C0+I0))/(ord(t)*periode)))**(ord(t)*periode);
 mm(t+1) .. M(t+1) =e= M(t)+periode*(txabs*(Eb(t)+Ed(t)-A(t))-txdsp*(M(t)-Minf));
 ccumul .. cumul =e= sum(t\$(ord(t)<23), Eb(t)-A(t));
 pparam(t+1) .. param(t+1) =e= (A(t+1)-A(t))/(Eb(t+1)*tarc*periode);
 aacc(t+1) .. acc(t+1) =e= 0.5*(sqrt(sqr(param(t+1)-1)+sqr(epsilon))+param(t+1))+0.5;
 cca(t) .. Ca(t) =e= 1/3 * A(t)**3/Eb(t)**2 * lambda(t) * acc(t) * BK;
 dommage(t+2) .. dom(t+2) =e= dtwice*(M(t)-M0)/(2*Minf-M0);

 cc(t) .. (K(t)**alpha)*(L(t)**(1-alpha)) =e= C(t) + I(t) + Ca(t);
 kk(t+1) .. K(t+1) =e= K(t) + periode * (I(t) - txdpr * K(t));
 utilite .. U =e= sum(t, periode*log(C(t)*(1-dom(t)))*discount(t));
 ssaving(t) .. saving(t) =e= I(t) /(C(t) + I(t) + Ca(t));

 posit(t) .. A(t) =l= Eb(t);
 croiss(t+1) .. K(t+1) =g= K(t);
 tc(tlast) .. K(tlast) =g= 2*K0;
 stabil(t+1)\$ (ord(t)>24) .. M(t+1) =e= M(t);
 tc2(tlast) .. saving(tlast) =l= 0.25;

```

model starts /all/;

option nlp=conopt;

Solve starts maximizing U using nlp;

Display C.1, K.1, I.1, saving.1, Eb.1, A.1, Ca.1, M.1, U.1, decr;

file result /c:\gams\stii\costben\R450-chi.txt/ ;
put result ;
put @3,'t',@15,'A',@35,'I',@50,'C',@65,'saving',@80,'K',@95,'CA',@100,'Concent',@115,'dom'/;
loop(t,put
@3,t.tl,@15,A.1(t),@30,I.1(t),@45,C.1(t),@60,saving.1(t),@75,K.1(t),@90,CA.1(t),@105,M.1(t),@120,dom.1(t)/ );
put /;
put @3,'t',@15,'Eb',@30,'A',@45,'M'/;
loop(t,put @3,t.tl,@15,Eb.1(t),@30,A.1(t),@45,M.1(t)/ );
put /;
put @3,'Utilite',@15,U.1/;
put /;
put @3,'somme',@15,cumul.1/;

```

4. STARTS coûts efficacité – dommages non linéaires

* Modele STARTS couts benefices non lineaires

* -----

* Date de creation : 17:18 12/06/97

* -----

* Version correcte en dommages non lineaires

* Version utilisee en dommages non lineaires

* Equivalent pour 450 ppm Mcible 560

* Equivalent 550 ppm 655

* Equivalent 650 ppm 750

Sets t /1990,2000,2010,2020,2030,2040,2050,2060,2070,2080,
2090,2100,2110,2120,2130,2140,2150,2160,2170,2180,
2190,2200,2210,2220,2230,2240,2250,2260,2270,2280,
2290,2300/

tfirst(t) premiere periode

tlast(t) derniere periode;

Scalars	L0	population initiale	/5.3/
	txcrpop	taux de croissance (population+progres technique)	/0.02/
	K0	capital initial (G\$)	/95/
	C0	consommation initiale (G\$)	/14/
	I0	investissement initial (G\$)	/4/
	alpha	coefficient de K dans la fonction de production	/0.4233/
	txdpr	taux de depreciation du capital global	/0.03/
	Eb0	emissions initiales	/6/
	dcr	decrochement emissions-production	/1.228038/
	txdcr	taux de variation du decrochement emissions - production	/0.00667595/
	txabs	taux d'absorption des emissions dans l'atmosphere	/0.38/
	txdsp	taux de disparition du CO2 dans les puits	/0.0083/
	M0	concentration initiale en CO2	/354/
	Minf	concentration preindustrielle en CO2	/278/
	Mcible	plafond de concentration en CO2	/560.5/
	tarc	taux annuel de renouvellement du capital emetteur	/0.03/
	prglim	limite du progres technique autonome	/0.25/

Annexe 1

prgtx	taux de croissance du progres technique autonome sur A	/0.015/
epsilon	terme technique (pour approcher le max)	/0.01/
BK	cout de la backstop technology (M\$ par t)	/1.1/
dmx	dommages maximums dus a l'effet de serre	/1/
parad	parametre de la fonction de dommage	/38.05/
beta	parametre de Chichilnisky	/0.0/
periode	periode (ans)	/10/
delta	taux de preference pure pour le present	/0.03/;

Parameters	lambda(t)	progres technique
	L(t)	population
	discount(t)	facteur d'actualisation
	decr(t)	decrochement emissions - croissance
	Ed(t)	emissions dues a la deforestation;

```

tfirst(t) = yes$(ord(t) eq 1);
tlast(t) = yes$(ord(t) eq card(t));
lambda(t) = prglim + (1-prglim)*exp(-prgtx*(ord(t)-1)*periode);
L(t) = L0 * (1 + txcrpop)**((ord(t)-1)*periode);
discount(t) = 1 / (1 + delta)**((ord(t)-1)*periode);
discount(tlast) = discount(tlast)/delta;
* discount(t) = exp(-delta*log(ord(t)));
decr(t) = dcr*exp(-txdcr*((ord(t)-1)*periode));

```

```

loop(t,
  if(ord(t)<=21,
    Ed(t) = 1.4-((0.2/3)*(ord(t)-1));
  else
    Ed(t) = 0;
  );
);

```

Variables	K(t)	capital
	C(t)	consommation
	I(t)	investissement
	Eb(t)	emissions de base
	dom(t)	dommages dus a l'effet de serre
	acc(t)	acceleration
	param(t)	parametre acceleration
	A(t)	abatement
	Ca(t)	cout de reduction des emissions
	M(t)	concentration
	saving(t)	taux d'epargne
	U	utilite totale;

```

A.lo(t) = 0;
K.lo(t) = 0;
dom.lo(t) = 0;
C.lo(t) = C0;
I.lo(t) = 0;
M.lo(t) = 0;
Ca.lo(t) = 0;
Eb.lo(t) = Eb0;
param.lo(t) = -9;
acc.lo(t) = 0;
acc.fx(tfirst) = 1;
A.up(t) = 30;
I.up(t) = 10000;

```

```

param.up(t) = +9;
acc.up(t) = 9;
dom.up(t) = 0.9;
K.fx(tfirst) = K0;
M.fx(tfirst) = M0;
dom.fx(tfirst) = 0;
dom.fx('2000')= 0;
A.fx('1990') = 0;

```

```

*A.fx('2000') = 0;
*A.fx('2010') = 0;

```

Equations	eeb0(t)	emissions initiales
	eeb(t)	emissions de base
	pparam(t)	definition du parametre de l'acceleration
	aacc(t)	valeur de l'acceleration
	cca(t)	cout de l'abatement
	cc(t)	repartition de la production
	kk(t)	equation d'evolution du capital
	dommage(t)	valeur des dommages dus a l'effet de serre
	mm(t)	equation d'evolution de la concentration
	contrainte(t)	contrainte sur la concentration
	tc(t)	condition finale 2
	tc2(t)	controle de l'investissement finale
	ssaving(t)	calcul du taux d'epargne
	croiss(t)	impose a K de croitre
	posit(t)	impose a l'abatement d'etre inferieur a Eb
	utilite	fonction objectif;

```

eeb0(tfirst) .. Eb(tfirst) =e= Eb0;
eeb(t+1) .. Eb(t+1)=e=Eb0*(1 + decr(t+1)* ( log( (C(t+1)+I(t+1)) / (C0+I0) ) / (ord(t)*periode) )
) ** (ord(t)*periode);
mm(t+1) .. M(t+1) =e= M(t) + periode*(txabs*(Eb(t)+Ed(t)-A(t))-txdsp*(M(t)-Minf));

pparam(t+1) .. param(t+1) =e= (A(t+1)-A(t))/(Eb(t+1)*tarc*periode);
aacc(t+1) .. acc(t+1) =e= 0.5*(sqrt(sqr(param(t+1)-1)+sqr(epsilon))+param(t+1))+0.5;
cca(t) .. Ca(t) =e= 1/3 * A(t)**3/Eb(t)**2 * lambda(t) * acc(t) * BK;
contrainte(t) .. M(t) =l= Mcible;
dommage(t+2) .. dom(t+2) =e= dmax*exp( -sqr((Mcible-M(t))/parad) ) ;

cc(t) .. (K(t)**alpha)*(L(t)**(1-alpha)) =e= C(t) + I(t) + Ca(t);
kk(t+1) .. K(t+1) =e= K(t) + periode * (I(t) - txdpr * K(t));
utilite .. U =e= sum(t, periode*log(C(t)*(1-dom(t)))*discount(t));
croiss(t+1) .. K(t+1) =g= K(t);
posit(t) .. A(t) =l= Eb(t);
tc(tlast) .. K(tlast) =g= 2*K0;
tc2(tlast) .. saving(tlast) =l= 0.25;
ssaving(t) .. saving(t) =e= I(t) / (C(t) + I(t) + Ca(t));

```

```
Model starts /all/;
```

```
option nlp=conopt;
```

```
Solve starts maximizing U using nlp;
```

```
Display C.1, K.1, I.1, saving.1, Eb.1, A.1, Ca.1, M.1, U.1, decr;
```

```
file result /c:\gams\stii\costbnnl\450chi00.txt/ ;
```

```
put result ;
```

```
put @3,'t',@15,'A',@35,'I',@50,'C',@65,'saving',@80,'K',@95,'CA',@100,'Concent',@115,'dom'/;
```

```
loop(t,put
@3,t.tl,@15,A.l(t),@30,I.l(t),@45,C.l(t),@60,saving.l(t),@75,K.l(t),@90,CA.l(t),@105,M.l(t),@120,dom.l(t)/ );
put /;
put @3,'t',@15,'Eb',@30,'A',@45,'M'/;
loop(t,put @3,t.tl,@15,Eb.l(t),@30,A.l(t),@45,M.l(t)/ );
put /;
put @3,'Utilite',@30,U.l/;
```

Bibliographie

Abadie J., Carpentier J. [1969] "Generalization of the Wolfe Reduced Gradient method to the case of nonlinear constraints", in Fletcher R. (ed.) *Optimization*, Academic Press, New York, pp.37-47.

Drud A.S. [1985] "A GRG code for large sparse dynamic nonlinear optimization problems", *Mathematical Programming* Vol.31, 153-191.

Drud A.S. [1994] "CONOPT - A Large-Scale GRG Code", *ORSA Journal on Computing*, 6(2), 207-216.

Murtagh B.A., Saunders M.A. [1982] "A projected lagrangian algorithm and its implementation for sparse nonlinear constraints", *Mathematical Programming Study* Vol.16, 84-117.

Robinson S.M. [1972] "A quadratically convergent algorithm for general nonlinear programming problems", *Mathematical Programming* Vol.3, 145-156.

Annexe 2 Conditions du premier ordre du chapitre 4

1. Univers certain

1.1. « Solidarité universelle » dans un coûts efficacité (section 1.2.2)

Le Lagrangien du problème (4.15)-(4.19) s'écrit de la manière suivante :

$$\mathbf{L} = \sum_i \alpha_i \cdot l_i \cdot U_i(y_i - a_i) + \sum_i \beta_i \cdot \varphi^n \cdot l_i^f \cdot U_i(y_i^f - a_i^f) - \lambda \cdot [C(x) - \sum_i l_i \cdot a_i] - \mu \cdot [C^f(x) - \sum_i l_i^f \cdot a_i^f] - v \cdot [\bar{x} - x - x^f] \quad (\text{A-1})$$

Notons que la contrainte environnementale (4.19) est une contrainte inégalité. Le multiplicateur de Lagrange associé v peut ainsi en théorie être soit positif soit nul selon que la contrainte est active ou non. Nous supposons ici que cette contrainte est active, autrement dit que la qualité de l'atmosphère qui aurait été obtenue sans contrainte environnementale aurait été inférieure au seuil \bar{x} . Par contre, nous ne faisons pas apparaître dans le Lagrangien de multiplicateur associé aux contraintes de positivité des dépenses d'abattement (4.16) que nous supposons non actives (i.e. les abattement sont strictement positifs). Les conditions du premier ordre sont alors données par les équations suivantes :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_i} = 0 \Leftrightarrow \alpha_i \cdot \frac{\partial U_i}{\partial c} = \lambda \quad \forall i \quad (\text{A-2})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_i^f} = 0 \Leftrightarrow \beta_i \cdot \varphi^n \cdot \frac{\partial U_i}{\partial c^f} = \mu \quad \forall i \quad (\text{A-3})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial x} = 0 \Leftrightarrow \lambda \cdot C'(x) = v \quad (\text{A-4})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial x_i^f} = 0 \Leftrightarrow \mu \cdot C^{f'}(x^f) = v \quad (\text{A-5})$$

1.2. « Solidarité universelle » en coûts bénéfices

Le Lagrangien du problème (4.28)-(4.31) s'écrit maintenant de la manière suivante, en considérant toujours que la condition (4.29) de stricte positivité des coûts d'abattement est satisfaite.

$$\mathbf{L} = \sum_i l_i \cdot \alpha_i \cdot U_i(c_i) + \varphi^n \cdot \sum_i l_i^f \cdot \beta_i \cdot U_i(c_i^f - d_i(x + x^f)) - \lambda \cdot [C(x) - \sum_i l_i \cdot a_i] - \mu \cdot [C^f(x) - \sum_i l_i^f \cdot a_i^f] \quad (\text{A-6})$$

Soit les conditions du premier ordre suivantes :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_i} = 0 \Leftrightarrow \alpha_i \cdot \frac{\partial U_i}{\partial c} = \lambda \quad (\text{A-7})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_i^f} = 0 \Leftrightarrow \beta_i \cdot \varphi^n \cdot \frac{\partial U_i}{\partial c^f} = \mu \quad (\text{A-8})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \mathbf{x}} = 0 \Leftrightarrow \lambda \cdot C'(\mathbf{x}) = -\varphi^n \cdot \sum_i d_i'(x+x^f) \cdot l_i^f \cdot \beta_i \cdot \frac{\partial U_i}{\partial c^f} \quad (\text{A-9})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial x_i^f} = 0 \Leftrightarrow \mu \cdot C^{f'}(x^f) = -\varphi^n \cdot \sum_i d_i'(x+x^f) \cdot l_i^f \cdot \beta_i \cdot \frac{\partial U_i}{\partial c^f} \quad (\text{A-10})$$

2. « Solidarité dynastique »

2.1. Coûts efficacité

Le Lagrangien de problème (4.41) – (4.45) est donné par :

$$\mathbf{L} = \sum_i l_i \cdot \alpha_i \cdot W_i(y_i - a_i, y_i^f - a_i^f) - \lambda \cdot [C(x) - \sum_i l_i \cdot a_i] - \mu \cdot [C^f(x^f) - \sum_i l_i^f \cdot a_i^f] - v \cdot [\bar{x} - x - x^f] \quad (\text{A-11})$$

Soit les conditions du premier ordre suivantes :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_i} = 0 \Leftrightarrow \alpha_i \cdot \frac{\partial W_i}{\partial c} = \lambda \quad (\text{A-12})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_i^f} = 0 \Leftrightarrow l_i \cdot \alpha_i \cdot \frac{\partial W_i}{\partial c^f} = l_i^f \cdot \mu \quad (\text{A-13})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial x} = 0 \Leftrightarrow \lambda \cdot C'(x) = v \quad (\text{A-14})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial x_i^f} = 0 \Leftrightarrow \mu \cdot C^{f'}(x^f) = v \quad (\text{A-15})$$

2.2. Coûts bénéfiques

Le Lagrangien du système (4.60)-(4.63) s'écrit de la manière suivante :

$$\mathbf{L} = \sum_i l_i \cdot \alpha_i \cdot W_i(y_i - a_i, y_i^f - a_i^f - d_i(x+x^f)) - \lambda \cdot [C(x) - \sum_i l_i \cdot a_i] - \mu \cdot [C^f(x^f) - \sum_i l_i^f \cdot a_i^f] \quad (\text{A-16})$$

Les conditions du premier ordre sont ainsi données par :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_i} = 0 \Leftrightarrow \alpha_i \cdot \frac{\partial W_i}{\partial c} = \lambda \quad (\text{A-17})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_i^f} = 0 \Leftrightarrow l_i \cdot \alpha_i \cdot \frac{\partial W_i}{\partial c^f} = l_i^f \cdot \mu \quad (\text{A-18})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial x} = 0 \Leftrightarrow \lambda \cdot C'(x) = -\sum_i d_i'(x+x^f) \cdot l_i \cdot \alpha_i \cdot \frac{\partial W_i}{\partial c^f} \quad (\text{A-19})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial x_i^f} = 0 \Leftrightarrow \mu \cdot C^{f'}(x^f) = -\sum_i d_i'(x+x^f) \cdot l_i \cdot \alpha_i \cdot \frac{\partial W_i}{\partial c^f} \quad (\text{A-20})$$

3. Univers incertain

Le Lagrangien du problème (4.68)-(4.71) s'écrit de la manière suivante :

$$\mathbf{L} = \sum_i l_i \cdot \alpha_i \cdot U_i(y_i - a_i) + \sum_j p_j \cdot \varphi^n \cdot \sum_i l_i^f \cdot \beta_i \cdot U_i^f(y_i^f - a_{ij}^f - d_{ij}(x + x_j^f)) - \lambda \cdot [C(x) - \sum_i l_i \cdot a_i] - \sum_j p_j \cdot \mu_j \cdot [C^f(x_j^f) - \sum_i l_i^f \cdot a_{ij}^f] \quad (\text{A-21})$$

Les conditions du premier ordre sont donc :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_i} = 0 \Leftrightarrow \alpha_i \cdot \frac{\partial U_i}{\partial c} = \lambda \quad (\text{A-22})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_{ij}^f} = 0 \Leftrightarrow \beta_i \cdot \varphi^n \cdot \frac{\partial U_i}{\partial c^f} = \mu_j \quad (\text{A-23})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial x} = 0 \Leftrightarrow \lambda \cdot C'(x) = -\varphi^n \cdot \sum_i \beta_i \cdot l_i^f \cdot \frac{\partial U_i}{\partial c^f} \cdot \sum_j p_j \cdot d_{ij}'(x + x_j^f). \quad (\text{A-24})$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial x_j^f} = 0 \Leftrightarrow \mu_j \cdot C^{fj}(x^f) = -\varphi^n \cdot \sum_i d_{ij}(x + x_j^f) \cdot l_i^f \cdot \beta_i \cdot \frac{\partial U_i}{\partial c^f} \quad (\text{A-25})$$

Annexe 3 Code informatique du modèle STARTS 2 (chapitre 6, section 2)

Le modèle STARTS 2 a été développé en langage GAMS. Dans le code présenté ici, le modèle est divisé en deux parties : le module principal nommé STARTS2.GMS, et un fichier annexe nommé ST_REF.INC consacré à la calibration du modèle et aux stockages des données.

1. STARTS 2 : Corps du Modèle

Fichier STARTS2.gms

```
* Model STARTS sectorialise
* Nouvelle version tiree de STARTS 3B9.gms
* Creation : 3 decembre 1999
* Par : Franck Lecocq, CIRED
* Fichiers "include" : st_ref.inc
```

```
option iterlim = 5000 ;
option reslim = 4000 ;
```

Set

```
      t      temps      /1*41/
      g      generation /1*12/
      i      secteur  /R,F/
```

;

Scalar

```
      ai      annee initiale      /2000/
      be      fraction des emissions absorbees dans l'atmosphere /0.00038/
      de      terme de "fuite" des emissions      /0.01/
      mi      concentration atmospherique initiale en CO2 (ppm) /360/
      mpre    concentration preindustrielle en CO2 (ppm) /274/
      pe      duree de la periode (annees)      /5/
      txac    taux d'actualisation annuel
```

;

Parameter

```
      actu(t)  facteur d'actualisation
      cco1(i)  coefficient du terme d'ordre 1 de la fonction de couts
      cmx(i)  cout maximal de reduction des emissions par secteur
      ctde(i)  vitesse du progres technique autonome
      ctli(i)  limite du progres technique autonome
      ctmx(t,i) couts de reduction des emissions
      *      el(t)      emissions non fossiles de reference
      *      ki(g,i)   generations de capital initiales
      *      kr(t,i)   niveau de capital de reference par secteur
      ng(i)    nombre de generations de capital pour chaque secteur (periodes)
      *      xi(g,i)   coefficients d'emissions initiaux
      *      xr(t,i)   coefficients d'emissions de reference
      *      yr(t)    niveau de production totale de reference
```

;

```
ng('R') = card(g);
```

Annexe 3

ng('F') = 5;

* Parametres de la fonction de couts

cco1(i) = 0;
cmx('R') = 1;
cmx('F') = 0.5;
Ctli(i) = 0.25;
Ctde('R') = 0.0025;
Ctde('F') = 0.01;

ctmx(t,i) = cmx(i)*(ctli(i) + (1-ctli(i))*(1+ctde(i))**(-(ord(t)-1)*pe));
display ctmx;

* Defini la dynamique de croissance de reference : txac, el, kr, yr, xr, ki, xi
\$include st_ref.inc

actu(t) = (1/(1+txac))**((ord(t)-1)*pe);

Variables

C(t) couts d'investissement a la periode t
CT(t,i) surcouts annuels de "leap frogging"
CTOT couts totaux d'investissement actualises
E(t,i) emissions par secteur
IV(t,i) investissement annuel
K(t,g,i) quantite totale de capital de la generation g
M(t) concentration atmospherique en CO2
X(t,g,i) coefficient d'emissions annuelles par unite de capital
XN(t,i) nouveau coefficient d'emissions a t

;

Positive variables C,CT,IV,K,M,X,XN;

* Valeurs initiales

K.fx('1',g,i) = ki(g,i);
M.fx('1') = mi;
X.fx('1',g,i) = xi(g,i);

* Les coefficients d'emissions ne peuvent se degrader par rapport a la situation actuelle
XN.up(t,i) = xr(t,i);

* Point de depart de l'optimisation

XN.l(t,i) = xr(t,i);
X.l(t,g,i) = xintr(t,g,i);
K.l(t,g,i) = kint(t,g,i);

Equations

Emis(t,i) Emissions annuelles a la periode t
Cout(t) Consommation annuelle a la periode t
Ctec(t,i) Couts de "leap frogging" annuels a la periode t
Trsk(t,g,i) Decalage du capital pour les generations sauf la premiere
Ivst(t,i) L'investissement devient generation de capital la plus recente
Cstr(t,i) La quantite totale de capital dans chaque secteur egale la valeur de reference
Trsx(t,g,i) Transition des coefficients d'emissions pour les generations sauf la premiere
Xdnx(t,i) Le coefficient technique a la premiere periode est inclus
Xdim(t,i) Les coefficients d'emissions diminuent entre deux periodes
Conc(t) Variation de la concentration entre deux periodes
Mmax Contrainte de concentration
Maxi Objectif de maximisation

;

```

* Definition de l'etat a la periode t
Emis(t,i)..      E(t,i) =e= sum(g$(ord(g)<=ng(i)), K(t,g,i)*X(t,g,i));
Cout(t) ..      C(t) =e= sum(i, IV(t,i)*(1+CT(t,i)));
Ctec(t,i) ..    CT(t,i) =e= ctmx(t,i)*(sqr(1-XN(t,i)/xr(t,i))+cco1(i)*(1-XN(t,i)/xr(t,i)));

* Transition du capital entre t et t+1
Trsk(t+1,g+1,i) .. K(t+1,g+1,i) =e= K(t,g,i);
Ivst(t+1,i) ..    K(t+1,'1',i) =e= pe*IV(t,i);
Cstr(t+1,i) ..    sum(g$(ord(g)<=ng(i)), K(t+1,g,i)) =e= kr(t+1,i);

* Transition des coefficients techniques entre t et t+1
Trsx(t+1,g+1,i) .. X(t+1,g+1,i) =e= X(t,g,i);
Xdnx(t+1,i) ..    X(t+1,'1',i) =e= XN(t,i);
Xdim(t+1,i) ..    XN(t+1,i) =l= XN(t,i);

* Dynamique de la concentration
Conc(t+1) ..      M(t+1) =e= M(t) + pe*(be*(sum(i,E(t,i))+el(t)) - de*(M(t) - mpre));

* Contrainte de concentration
Mmax(t) ..      M(t) =l= 450;

* Niveau total de consommation actualisee
Maxi ..         CTOT =e= sqr(sum(t$(ord(t)<card(t)), pe*C(t)*actu(t)));

Model STARTS /Emis,Cout,Ctec,Trsk,Ivst,Cstr,Trsx,Xdnx,Xdim,Conc,Mmax,Maxi/;
Solve STARTS minimizing CTOT using nlp;

File Sortie2 /c:\calcul\st_res2.txt/;
Put Sortie2;
Sortie2.pw = 255; Sortie2.pc = 5;
Put 'Niveaux de capital/';
Put 'temps','KR','KF','KRref','KFref','KRTref','KFTref/';
loop(t,
  Put t.tl,K.l(t+1,'1','R'),K.l(t+1,'1','F'),kint(t+1,'1','R'),kint(t+1,'1','F'),kr(t,'R'),kr(t,'F')/;
);
Put 'Coefficients d emissions/';
Put 'generation','XiR','XiF/';
loop(g,
  Put g.tl,xi(g,'R'),xi(g,'F')/;
);
Put 'Coefficients d emissions/';
Put 'temps','XR','XF','XRref','XFref/';
loop(t,
  Put t.tl,XN.l(t,'R'),XN.l(t,'F'),xr(t,'R'),xr(t,'F')/;
);
Put 'Emissions et concentrations/';
Put 'temps','ER','EF','ERref','EFref','M/';
loop(t,
  Put t.tl,E.l(t,'R'),E.l(t,'F'),Eref(t,'R'),Eref(t,'F'),M.l(t)/;
);
Sortie2.nd = 5;
Put 'Investissements, couts et niveaux de consommation/';
Put 'temps','CTR','CTF','IR','IF','IRref','IFref','C','Cref/';
Loop(t,
  Put
t.tl,CT.l(t,'R'),CT.l(t,'F'),(IV.l(t,'R')*(1+CT.l(t,'R'))),(IV.l(t,'F')*(1+CT.l(t,'F'))),iref(t,'R'),iref(t,'F'),(yr(t)-
C.l(t)),(yr(t)-sum(i,iref(t,i)))/;
);
Put 'ConsTot','ConsTotref/';
Put (pe*sum(t,actu(t)*yr(t))-sqrt(CTOT.l)),(pe*sum(t, actu(t)*(yr(t)-sum(i,iref(t,i)))))/;

```

2. Modèle STARTS 2 : Fichier annexe

Fichier ST_REF.INC.

* Model STARTS sectorialise
 * Fichier "include" : st_ref.inc
 * Creation : 4 decembre 1999
 * Par : Franck Lecocq, CIRED
 * Defini les parametres de la croissance de reference : txac, el, kr, yr, xr, ki, xi

* CROISSANCE ET INVESTISSEMENT

* Nous determinons le niveau de capital et d'investissement initial en supposant que nous
 * nous trouvons dans une economie en equilibre a un taux de croissance de 2,5%... Ce qui nous
 * permet d'examiner une distribution du capital par generation optimale ex ante.
 * Il serait important d'examiner ensuite la distribution reelle du capital par pays, ce qui
 * peut conduire a des chocs importants dans le futur (cf. le nucleaire en France...).

Scalar

crfu	Taux de croissance 2000-2200	/0.025/
crps	Taux de croissance 1940-2000	/0.025/
ppp	Taux de preference pure pour le present	/0.03/
pri	Part du capital rigide dans K total	/0.2/
txep	Taux d'epargne en 2000 (suppose constant)	/0.20/
yi	Production initiale (10 ¹² \$90)	/18/

;

Parameter

ki(g,i)	generations de capital initiales de reference
kr(t,i)	capital total futur de reference
iref(t,i)	investissement de reference
yr(t)	production totale de reference

;

Variables

KK(i)	Niveau de capital total initial dans le secteur i
II(i)	Niveau d'investissement initial dans chaque secteur
J1	Critere de minimisation;

Positive variable KK, II;

Eqlb(i)	equilibre le niveau de capital et les niveaux d'investissement
Epar	verifie que le taux d'epargne est bien respecte
Krat	verifie la distribution du capital entre secteurs;

Eqlb(i) ..	$KK(i) * ((1 + crps)^{pe} - 1) = e = pe * II(i) * (1 - (1 + crps)^{-ng(i) * pe})$;
Epar ..	$\sum(i, II(i)) = e = txep * yi$;
Krat ..	$J1 = e = (KK('R') * (1 - pri) - KK('F') * pri)^2$;

Model CINI /eqlb, epar, krat/;
 Solve CINI minimizing J1 using nlp;

$ki(g,i) = pe * II.l(i) * (1 + crps)^{-ord(g) * pe}$;
 $kr(t,i) = KK.l(i) * (1 + crfu)^{ord(t) - 1 * pe}$;
 $yr(t) = yi * (1 + crfu)^{ord(t) - 1 * pe}$;
 $iref(t,i) = II.l(i) * (1 + crfu)^{ord(t) - 1 * pe}$;
 $txac = ppp + crfu$;

display ki, kr;

* COEFFICIENTS D'EMISSIONS DE REFERENCE XR

- * Les coefficients d'émmissions pour les périodes antérieures a 2000 sont tout d'abord
- * en supposant que les coefficients ont diminué d'un pourcentage constant entre 1940
- * et 2100.
- * Les coefficients d'émmissions futurs sont ensuite calculés de manière itérative
- * a partir d'un scénario d'émmissions de référence.
- * Ils sont enfin "lisses" afin d'obtenir une courbe régulièrement décroissante et les
- * émmissions de référence sont recalculés de manière à être cohérentes avec les coefficients
- * xr.

Scalar

psrei	Part du secteur rigide dans les émmissions en 2000	/0.25/
psref	Part du secteur rigide dans les émmissions en 2200	/0.4/

;

Parameter

Eref(t,i)	Émmissions de référence par secteur
KINT(t,g,i)	Generations de capital intermediaires
pse(t,i)	Part du secteur dans les émmissions
txie(i)	Taux de croissance de l'intensité énergétique 1940-2000
xi(g,i)	Coefficients d'émmissions initiaux
XINT(t,g,i)	Coefficients d'émmissions a chaque date (parametre intermediaire)
xr(t,i)	Coefficients d'émmissions de référence

;

Parameter

Eref(t) Émmissions de référence (GtC par an) basees sur IIASA A2

/	1	7000
	2	7750
	3	8500
	4	9250
	5	10000
	6	10800
	7	11900
	8	12700
	9	13300
	10	14000
	11	15100
	12	16100
	13	16900
	14	17800
	15	18700
	16	19700
	17	20400
	18	21300
	19	21900
	20	22000
	21	22100
	22	22050
	23	22000
	24	21500
	25	21000
	26	20000
	27	19000
	28	18000
	29	17000
	30	15500
	31	14000
	32	12000
	33	10000

Annexe 3

34 8000
 35 7000
 36 6500
 37 6000
 38 5500
 39 5000
 40 4500
 41 4000/;

pse(t,'R') = psrei + (psref-psrei)/(card(t)-1)*(ord(t)-1);
 pse(t,'F') = 1-pse(t,'R');

Eref(t,i) = Eref(t)*pse(t,i);

* calibration des coefficients d'emissions anterieurs a 2000

txie('R') = 0.0018;
 txie('F') = 0.007;

Variable

XXI(i) coefficient d'emissions initial a la premiere periode x
 J2 objectif de minimisation

;

Positive variable XXI;

Equations

Obje Objectif de minimisation

;

Obje .. J2 = sum(i, sqrt(sqr(sum(g\$(ord(g)<=ng(i)), XXI(i)*(1+txie(i))**(pe*(ord(g)-1))*ki(g,i)) -
 Eref('1',i))));

Model XINI1 /obje/;

Solve XINI1 minimizing J2 using nlp;

xi(g,i) = XXI.l(i)*(1+txie(i))**(pe*(ord(g)-1));

* calcul iteratif des coefficients d'emissions futurs en fonction des emissions de reference

XINT('1',g,i) = xi(g,i);

KINT('1',g,i) = ki(g,i);

Loop(t,

KINT(t+1,g+1,i) = KINT(t,g,i);

KINT(t+1,'1',i) = pe*iref(t,i);

XINT(t+1,g+1,i) = XINT(t,g,i);

XINT(t+1,'1','R')=(Eref(t+1,'R')-Eref(t,'R')+KINT(t,'12','R')*XINT(t,'12','R'))/KINT(t+1,'1','R');

XINT(t+1,'1','F')=(Eref(t+1,'F')-Eref(t,'F')+KINT(t,'5','F')*XINT(t,'5','F'))/KINT(t+1,'1','F');

);

xr(t,i) = XINT(t+1,'1',i);

xr(t,i)\$ (ord(t) eq card(t)) = 0;

* Le fichier sortie 1 rassemble les informations sur les coefficients d'emissions et les
 * emissions de reference avant et apres lissage.

File sortie1 /c:\calcul\st_res1.txt/;

Put Sortie1;

Put 'Modele starts.gms'/;

Put 'Donnees calibrees a partir du scenario d emissions de reference'/;

```

Put 'generation_____xiR_____xiF'/;
Loop(g,
  Put g.tl, xi(g,'R'), xi(g,'F')/;
);
Put 'temps_____xrR_____xF_____ER_____EF'/;
Loop(t,
  Put t.tl, xr(t,'R'), xr(t,'F'), Eref(t,'R'), Eref(t,'F')/;
);

* "lissage" des coefficients d'emissions

Set    j          /1*5/;

Variable
      coef(i,j) coefficient du terme polynomial de degre j
      J3          Objectif de minimisation
;

Equations
      pass(i) la courbe passe par le point de depart
      obj3     minimisation
;

pass(i) .. sum(j,coef(i,j)*(1/card(t)**(ord(j)-1))) =e= xr('1',i);
Obj3    .. J3 =e= sum(i, sum(t, sqr(sum(j,coef(i,j)*(ord(t)/card(t)**(ord(j)-1)) - xr(t,i)))));

Model  lissage /pass, obj3/;
Solve lissage minimizing J3 using nlp;

* Le coefficient 0.01 et non 0 dans l'equation precedente permet de diviser ensuite par xr
xr(t,i) = max(sum(j, coef.l(i,j)*(ord(t)/card(t)**(ord(j)-1))), 0.01);

* calcul des nouvelles emissions de reference

Parameter  xintr(t,g,i);
xintr('1',g,i) = xi(g,i);
loop(t,
  Eref(t,i) = sum(g$(ord(g)<=ng(i)), xintr(t,g,i)*kint(t,g,i));
  xintr(t+1,g+1,i) = xintr(t,g,i);
  xintr(t+1,'1',i) = xr(t,i);
);

* EMISSIONS NON FOSSILES

Parameter  el(t)          Emissions non fossiles annuelles de reference (MtC par an);

loop(t, if(ord(t)<=22,   el(t) = 1400-((200/3)*(ord(t)-1));
                    else   el(t) = 0;));

* SORTIES FINALES

Put 'Donnees lissees'/;
Put 'temps_____xrR_____xF_____ER_____EF_____Eland-use'/;
Loop(t,
  Put t.tl, xr(t,'R'), xr(t,'F'), Eref(t,'R'), Eref(t,'F'), el(t)/;
);

```


Annexe 4 Caractéristiques numériques des scénarios de référence Ha, Hb, La et Lb (chapitre 8, section 2.2.2)

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW	TOTAL
1990	48	413	124	250	377	1242	1171	1655	5280
2000	51	437	131	270	393	1424	1412	2086	6204
2010	53	453	133	283	398	1554	1635	2599	7108
2020	55	470	135	296	404	1683	1858	3112	8012
2030	55	482	135	301	404	1775	2051	3593	8797
2040	55	491	133	300	399	1831	2213	4042	9463
2050	55	499	132	298	394	1886	2375	4490	10129
2060	54	498	131	298	393	1900	2427	4680	10381
2070	54	497	131	297	392	1913	2479	4869	10633
2080	54	496	131	296	390	1926	2533	5071	10898
2090	54	495	130	296	389	1940	2588	5284	11177
2100	54	494	130	295	388	1953	2643	5497	11455

1. **Populations** (millions d'habitants) dans les quatre scénarios (Source : Leggett *et al.*, 1992, Morita et Lee, 1997)

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW	TOTAL
1990	798	2089	2221	5501	6046	2028	1356	2461	22500
2000	954	1416	2655	6575	7227	3002	2007	3643	27479
2010	1141	1726	3173	7859	8638	4444	2971	5392	35344
2020	1363	2104	3793	9394	10326	6578	4398	7982	45937
2030	1630	2565	4534	11228	12342	9736	6510	11815	60361
2040	1948	3127	5419	13421	14753	14412	9637	17490	80206
2050	2328	3811	6477	16042	17634	21334	14265	25889	107780
2060	2783	4646	7742	19175	21078	31579	21115	38322	146441
2070	3327	5663	9254	22921	25194	46745	31256	56726	201085
2080	3976	6904	11062	27397	30115	69194	46266	83968	278881
2090	4753	8415	13222	32748	35997	102424	68485	124293	390336
2100	5681	10258	15805	39143	43027	151613	101374	183984	550884

2.1 **PIB** (milliards de dollars 1990) dans les scénarios de haute croissance (H)

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW	TOTAL
1990	798	2089	2221	5501	6046	2028	1356	2461	22500
2000	926	1416	2577	6384	7017	2725	1822	3307	26176
2010	1075	1726	2991	7408	8143	3663	2449	4445	31901
2020	1248	2104	3471	8598	9451	4922	3291	5973	39059
2030	1448	2565	4029	9978	10968	6615	4423	8028	48054
2040	1681	3127	4676	11580	12729	8891	5945	10789	59415
2050	1950	3811	5426	13439	14772	11948	7989	14499	73835
2060	2264	4646	6297	15596	17144	16057	10737	19486	92227
2070	2627	5663	7308	18100	19896	21580	14429	26187	115791
2080	3049	6904	8482	21006	23090	29001	19391	35193	146116
2090	3538	8415	9843	24378	26797	38975	26060	47297	185305
2100	4106	10258	11423	28292	31099	52380	35023	63563	236145

2.2 **PIB** (milliards de dollars 1990) dans les scénarios de basse croissance (H)

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW
μ_r	1,68	1,12	1,33	1,092	1,19	1,498	1,33	1,148
v_r	-16,88%	-9,45%	-12,83%	-9,45%	-12,15%	-9,45%	-9,45%	-9,45%

3.1 Elasticité PIB des émissions initiale et taux de variation annuel de cette élasticité dans les scénarios a (décroissance rapide de l'élasticité)

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW
μ_r	1,2	0,8	0,95	0,78	0,85	1,07	0,95	0,82
v_r	-9,38%	-5,25%	-7,13%	-3,75%	-6,75%	-4,50%	-4,39%	-3,75%

3.2 Elasticité PIB des émissions initiale et taux de variation annuel de cette élasticité dans les scénarios b (décroissance lente de l'élasticité)

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW	TOTAL
1990	179	1467	272	1350	835	648	198	807	5756
2000	218	1097	318	1541	960	969	282	1097	6482
2010	257	1285	363	1736	1078	1398	389	1448	7953
2020	293	1474	403	1930	1181	1947	519	1855	9601
2030	322	1656	437	2116	1263	2618	667	2309	11389
2040	344	1822	462	2290	1319	3398	830	2790	13254
2050	354	1964	476	2445	1344	4258	997	3273	15111
2060	353	2073	478	2576	1338	5150	1157	3729	16853
2070	340	2143	468	2678	1300	6013	1297	4125	18364
2080	317	2170	447	2747	1232	6777	1405	4431	19526
2090	286	2152	416	2780	1141	7373	1471	4622	20241
2100	249	2090	377	2777	1031	7743	1487	4682	20437

4.1 Emissions de CO₂ régionales dans le scénario Hb

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW	TOTAL
1990	179	1467	272	1350	835	648	198	807	5756
2000	234	985	337	1613	1010	1124	321	1220	6844
2010	289	1228	399	1863	1171	1809	485	1712	8956
2020	335	1476	451	2081	1299	2705	678	2232	11257
2030	367	1708	487	2247	1380	3756	882	2701	13527
2040	377	1905	503	2346	1404	4841	1064	3035	15475
2050	366	2046	496	2368	1368	5795	1192	3167	16797
2060	334	2116	467	2311	1276	6441	1241	3069	17254
2070	287	2109	420	2181	1140	6648	1199	2761	16744
2080	232	2025	361	1989	975	6371	1076	2306	15335
2090	177	1872	296	1755	799	5669	896	1789	13253
2100	127	1667	232	1497	626	4684	693	1289	10816

4.2 Emissions de CO₂ régionales dans le scénario Ha

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW	TOTAL
1990	179	1467	272	1350	835	648	198	807	5756
2000	211	1097	310	1508	938	877	259	1017	6217
2010	242	1285	346	1665	1033	1157	330	1254	7311
2020	270	1474	378	1819	1115	1485	409	1511	8461
2030	293	1656	404	1965	1180	1856	495	1782	9629
2040	309	1822	423	2098	1223	2259	583	2055	10772
2050	316	1964	434	2216	1243	2678	669	2318	11838
2060	315	2073	435	2315	1238	3090	749	2558	12773
2070	306	2143	428	2391	1208	3473	816	2760	13525
2080	289	2170	411	2443	1156	3801	867	2913	14049
2090	265	2152	387	2467	1084	4050	897	3007	14309
2100	236	2090	357	2464	996	4203	905	3036	14287

4.3 Emissions de CO₂ régionales dans le scénario Lb

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW	TOTAL
1990	179	1467	272	1350	835	648	198	807	5756
2000	224	985	325	1572	979	985	287	1111	6468
2010	267	1228	374	1795	1107	1428	396	1469	8064
2020	302	1476	415	2009	1207	1972	522	1866	9769
2030	326	1708	442	2203	1270	2597	657	2279	11481
2040	334	1905	454	2367	1288	3259	789	2674	13070
2050	325	2046	449	2494	1260	3900	904	3014	14391
2060	301	2116	427	2575	1189	4448	989	3265	15310
2070	265	2109	391	2605	1083	4836	1032	3398	15720
2080	222	2025	344	2584	950	5012	1028	3399	15565
2090	177	1872	292	2512	804	4952	978	3266	14853
2100	134	1667	238	2393	657	4664	887	3016	13657

4.4 Emissions de CO₂ régionales dans le scénario La


```
*****
* MODULE 1 : REFERENCE GROWTH RATE COMPUTATION *****
*****
```

```
Parameter      gref(t,r) reference growth rate;
$include mod1.gms
```

```
*****
* MODULE 2 : GDP TO GROWTH RELATION COMPUTATION *****
*****
```

```
Parameters      alpha(r) CO2 to GDP parameter 1
                 beta(r) CO2 to GDP parameter 2;
$include mod3.gms
```

```
* ABATEMENT COSTS DATA *****
```

```
$include /Include/STARTSRcst2.inc
```

```
* RULES DATA *****
```

```
$include /Include/STARTSRruleBh.inc
```

```
*****
* MODULE 3 : PERMITS MARKET EQUILIBRIUM COMPUTATION *****
*****
```

```
Set      market(r)      lists regions in market;
Alias(t,u);
```

```
Parameters      A(t,r,s) Effective abatement level (in % of baseline emissions)
                 Ec(t,r,s) Corrected refence CO2 Emissions (MtC per year)
                 GDP(t,r,s) Effective GDP (G$ per year)
                 Cmar(t,r,s) Marginal abatement costs ($ per tC)
                 Ctot(t,r,s) Total abatement costs (G$ per year)
                 Tsf(t,r,s) Incoming transfer (G$ per year)
                 Sps(t,r,s) Surplus from transfers (total costs minus transfers) (G$ p year)
                 E(t,r,s) Effective emissions (MtC per year)
                 p(t,s) Effective permit price ($ per tC);
```

```
a(t,r,s) = 0; Ec(t,r,s) = Eref(t,r); GDP(t,r,s) = GDPref(t,r);
Cmar(t,r,s) = 0; Ctot(t,r,s) = 0; Tsf(t,r,s) = 0; Sps(t,r,s) = 0;
E(t,r,s) = Eref(t,r); p(t,s) = 0;                !! Parameters initialisation
```

```
* Market equilibration model *****
```

```
Parameter      EEref(r) Reference emissions (MtC per yr)
                 QQta(r) Emissions quota (MtC per yr)
                 CCoe(i,r) Abatement costs coefficients;
```

```
Variables      AA(r) Abatement level (% of baseline emissions)
                 CC(r) Current emission reduction costs (transfers included) in G$
                 CCTot Total discounted costs (in G$);
```

```
Positive variable AA, CC;
AA.up(r)=1;
```

```
Equations      DEFCosts(r) Abatement costs computation
                 DEFCtot Total discounted costs computation
                 CSTR Global constraint on emissions;
```

```

DEFCosts(r)$market(r) .. CC(r) = e= EERef(r)*sum(i,ccoe(i,r)*power(AA(r),ord(i)+1)/(ord(i)+1));
DEFCtot          .. CCtot = e= sum(r$market(r), CC(r));
CSTR              .. sum(r$market(r),((1-AA(r))*EERef(r)-QQta(r))) = l= 0;

Model equi      /DEFCosts,DEFCtot,CSTR/;

* Scenario loop beginning *****

loop(s,

* Time loop beginning *****

    loop(t$(ord(t)>2),
        market(r)=no;
        market(r)$flag(t,r)=yes;          !! Regions in market

        QQta(r)=Qta(t,r,s);
        EERef(r)=Ec(t,r,s);
        CCoe(i,r)=coe(t,r,i);            !! Passes parameters to the equilibrium model

        Solve equi Minimizing CCTot using NLP;

        A(t,r,s)$market(r) = AA.l(r);
        Cmar(t,r,s) = sum(i,coe(t,r,i)*(a(t,r,s)**(ord(i)))));
        Ctot(t,r,s) = Ec(t,r,s)*sum(i,coe(t,r,i)*(a(t,r,s)**(ord(i)+1)/(ord(i)+1)))/1000;
        p(t,s) = Cmar(t,'USA',s);
        E(t,r,s) = (1-a(t,r,s))*Ec(t,r,s);
        Tsf(t,r,s)$market(r) = (Qta(t,r,s)-E(t,r,s))*p(t,s)/1000;
        Sps(t,r,s)$market(r) = Tsf(t,r,s) - Ctot(t,r,s); !! Computes transfers and surplus

        GDP(t+1,r,s) = GDP(t,r,s)*(1+gref(t+1,r))**(pr);
        GDP(t+1,r,s)$market(r) = GDP(t,r,s)*(1+gref(t+1,r))**(pr) +
        pr*(delta(r)+mu(r)+gref(t+1,r))*sigma(r)*Sps(t,r,s);

                                                !! Computes new GDP

        Ec(t+1,r,s)
Ec('1990',r,s)*(abs(GDP(t+1,r,s)/GDP('1990',r,s))**(alpha(r)+beta(r)*(ord(t)+1)));
                                                !! Computes new emissions
    );
);

* Model Output *****

File Output      /c:\calcul\result\5BhC2.res/;
Output.nd = 2;
Put Output;
Loop(s,
    Put 'scenario ',ceiling(s)/;
    Put /;
    Put 'Abatement'/;
    Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
    Put /;
    Loop(t,
        Put t.tl, loop(r,put(Ec(t,r,s)-E(t,r,s)));
        Put /;
    );
    Put 'Marginal abatement costs'/;

```

```

Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
Put /;
Loop(t,
    Put t.tl, loop(r,put(Cmar(t,r,s)));
    Put /;
);
Put 'Overall Costs';
Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
Put /;
Loop(t,
    Put t.tl, loop(r,put(Ctot(t,r,s)));
    Put /;
);
Put 'Transfers';
Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
Put /;
Loop(t,
    Put t.tl, loop(r,put(Tsf(t,r,s)));
    Put /;
);
Put 'Surpluses';
Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
Put /;
Loop(t,
    Put t.tl, loop(r,put(Sps(t,r,s)));
    Put /;
);
Put 'Baseline GDP';
Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
Put /;
Loop(t,
    Put t.tl, loop(r,put(GDPref(t,r)));
    Put /;
);
Put 'Effective GDP';
Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
Put /;
Loop(t,
    Put t.tl, loop(r,put(GDP(t,r,s)));
    Put /;
);
Put 'Baseline emissions';
Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
Put /;
Loop(t,
    Put t.tl, loop(r,put(Eref(t,r)));
    Put /;
);
Put 'Corrected baseline emissions';
Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
Put /;
Loop(t,
    Put t.tl, loop(r,put(Ec(t,r,s)));
    Put /;
);
Put 'Effective emissions';
Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
Put /;
Loop(t,
    Put t.tl, loop(r,put(E(t,r,s)));

```

```

        Put /;
    );
    Put 'Delta GDP'/;
    Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
    Put /;
    Loop(t,
        Put t.tl, loop(r,put(GDP(t,r,s)/GDPref(t,r)));
        Put /;
    );
    Put 'Delta Emissions'/;
    Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
    Put /;
    Loop(t,
        Put t.tl, loop(r,put(Ec(t,r,s)/Eref(t,r)));
        Put /;
    );
);
Loop(s,
    Put 'scenario ',ceiling(s)/;
    Put /;
    Put 'Quota'/;
    Put @1,'t',@15,loop(r,put r.tl);
    Put /;
    Loop(t,
        Put t.tl, loop(r,put(Qta(t,r,s)));
        Put /;
    );
);
* END OF PROGRAM *****

```

2. STARTS R : Module d'introduction des données brutes du scénario de référence (STARTSRbslXX.INC)

* File STARTSRbsl4.inc
 * Franck Lecocq, Thierry Le Pesant
 * Created: april, 26 1999
 * To be included within STARTSR2*.gms models

* Personal Baseline
 * Low growth, pessimistic about GDP to emissions relation

Set r regions /CNZ,FSU,JAP,USA,WEU,CHI,IND,ROW/;

	Table GDPref(t,r)		Gross Regional Product (billions \$)					
	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW
1990	798	2089	2221	5501	6046	2028	1356	2461
2000	926	1416	2577	6384	7017	2725	1822	3307
2010	1075	1726	2991	7408	8143	3663	2449	4445
2020	1248	2104	3471	8598	9451	4922	3291	5973
2030	1448	2565	4029	9978	10968	6615	4423	8028
2040	1681	3127	4676	11580	12729	8891	5945	10789
2050	1950	3811	5426	13439	14772	11948	7989	14499
2060	2264	4646	6297	15596	17144	16057	10737	19486
2070	2627	5663	7308	18100	19896	21580	14429	26187
2080	3049	6904	8482	21006	23090	29001	19391	35193
2090	3538	8415	9843	24378	26797	38975	26060	47297

2100 4106 10258 11423 28292 31099 52380 35023 63563
;

Table POPref(t,r) population de reference (millions)

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW
1990	48	413	124	250	377	1242	1171	1655
2000	51	437	131	270	393	1424	1412	2086
2010	53	453	133	283	398	1554	1635	2599
2020	55	470	135	296	404	1683	1858	3112
2030	55	482	135	301	404	1775	2051	3593
2040	55	491	133	300	399	1831	2213	4042
2050	55	499	132	298	394	1886	2375	4490
2060	54	498	131	298	393	1900	2427	4680
2070	54	497	131	297	392	1913	2479	4869
2080	54	496	131	296	390	1926	2533	5071
2090	54	495	130	296	389	1940	2588	5284
2100	54	494	130	295	388	1953	2643	5497;

Parameter GDPpref(t,r) per capita GDP (in \$ per person);
 $GDPpref(t,r) = GDPref(t,r)/POPref(t,r)*1000;$

Table Eref(t,r) reference CO2 emissions (MtC per year)

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW
1990	179	1467	272	1350	835	648	198	807
2000	224	985	325	1572	979	985	287	1111
2010	267	1228	374	1795	1107	1428	396	1469
2020	302	1476	415	2009	1207	1972	522	1866
2030	326	1708	442	2203	1270	2597	657	2279
2040	334	1905	454	2367	1288	3259	789	2674
2050	325	2046	449	2494	1260	3900	904	3014
2060	301	2116	427	2575	1189	4448	989	3265
2070	265	2109	391	2605	1083	4836	1032	3398
2080	222	2025	344	2584	950	5012	1028	3399
2090	177	1872	292	2512	804	4952	978	3266
2100	134	1667	238	2393	657	4664	887	3016

;

Parameter Empref(t,r) per capita emissions (in ton per person);
 $Empref(t,r) = Eref(t,r)/POPref(t,r);$

Parameter rho(r) regional discount rate (%)

/CNZ 0.05
 FSU 0.05
 JAP 0.05
 USA 0.05
 WEU 0.05
 CHI 0.05
 IND 0.05
 ROW 0.05/;

3. Sous-programme de calcul des taux de croissance régionaux

```
*****
* Model mod1.gms *
* Franck Lecocq, Thierry Le Pesant *
* Created: april, 23 1999 *
* To be used with STARTSR22.gms model *
* This model computes reference growth rates *
*****
```

```

gref(t,r)$ord(t)=1;
gref(t+1,r) = (GDPref(t+1,r)/GDPref(t,r))**(1/pr)-1;

```

```

Parameters      delta(r) pure time preference
                 mu(r)      capital depreciation rate
                 sigma(r) fraction of transfers invested;

```

```

delta(r)=0.01;
delta('CHI')=0.03; delta('IND')=0.03; delta('ROW')=0.03;
sigma(r) = 0.8;

```

```

Parameter      mu(r) capital depreciation rate
/CNZ  0.05
FSU   0.05
JAP   0.05
USA   0.05
WEU   0.05
CHI   0.05
IND   0.05
ROW   0.05/;

```

4. Sous-programme de calcul des élasticités PIB des émissions

```

*****
* Model mod2.gms *
* Franck Lecocq, Thierry Le Pesant *
* Created: april, 23 1999 *
* To be used with STARTSR22.gms model *
* This model computes emission to GDP relations *
*****

```

```

Parameter CO2pref(t,r);
CO2pref(t,r) = Eref(t,r)/POPref(t,r);

```

```

Parameters      CCO2(t)      Per capita emissions (MtC per cap)
                 GGDP(t)      Per capita GDP ($ per cap);

```

```

Variablec1
          c2
          DD(t)
          J;

```

```

Equations      DEFD(t)
               DEFJ;

```

```

DEFD(t)      .. DD(t) =e= log(CCO2(t)/CCO2('1990')) - (c1+c2*ord(t))*log(GGDP(t)/GGDP('1990'));
DEFJ         .. J =e= sum(t, sqr(DD(t)));

```

```

Model emissions /DEFD,DEFJ/;

```

```

Loop(r,
  CCO2(t) = Eref(t,r);
  GGDP(t) = GDPref(t,r);
  c1.l=0; c2.l=0;

```

```

  Solve emissions minimizing J using NLP;

```

```

  alpha(r)=c1.l;
  beta(r)=c2.l;

```

);

Parameter Erefbis(t,r);
 Erefbis('1990',r) = Eref('1990',r);
 Erefbis(t,r) $\$(ord(t)>1) = Erefbis('1990',r)*(GDPref(t,r)/GDPref('1990',r))^{*(alpha(r)+ord(t)*beta(r))};$

5. Module d'entrée des coûts d'abattement régionaux

* File STARTSRcst1.inc
 * Franck Lecocq, Thierry Le Pesant
 * Created: april, 21 1999
 * To be included within STARTSR2*.gms models

* Costs Edmonds
 * Extracted from 1997 SGM data (1990-2050) and extrapolated to 2100
 * Coefficients set equal for each period

Set i polynomial cost function exponents /1,2,3/;

Table coe(t,r,i) polynomial abatement cost function coefficients (k\$ per tC)

	1	2	3
1990.CNZ	0.6684	-2.7857	8.1187
1990.FSU	0.8424	-4.2413	6.7808
1990.JAP	0.6741	-0.1987	6.1690
1990.USA	1.0739	-6.7606	17.941
1990.WEU	1.7411	-14.505	40.494
1990.CHI	0.8339	-3.8297	5.1799
1990.IND	0.9452	-4.7378	7.2024
1990.ROW	0.5047	-1.8182	6.0947;

* Moves coefficient to \$ per tons of carbon
 coe(t,r,i) $\$(ord(t)>1)=coe('1990',r,i)*1000;$
 coe('1990',r,i)=coe('1990',r,i)*1000;

6. Module d'introduction des paramètres de la règle d'élargissement de l'annexe B et d'allocation des quotas d'émissions de CO₂

* File STARTSRruleA.inc
 * Franck Lecocq, Thierry Le Pesant
 * Created: april, 21 1999
 * To be included within STARTSR2*.gms models,

* Entitlement rule : convergence 2050

Set s scenario /1,2,3/;

Parameter ceiling(s) environmental target (max CO2 concentration in ppm)

/1	450
2	550
3	650/;

Table flag(t,r) countries in (1) or out (0) market

	CNZ	FSU	JAP	USA	WEU	CHI	IND	ROW
1990	0	0	0	0	0	0	0	0
2000	0	0	0	0	0	0	0	0

2010	1	1	1	1	1	0	0	0
2020	1	1	1	1	1	0	0	0
2030	1	1	1	1	1	1	1	1
2040	1	1	1	1	1	1	1	1
2050	1	1	1	1	1	1	1	1
2060	1	1	1	1	1	1	1	1
2070	1	1	1	1	1	1	1	1
2080	1	1	1	1	1	1	1	1
2090	1	1	1	1	1	1	1	1
2100	1	1	1	1	1	1	1	1;

Parameter Qta(t,r,s) CO2 emissions quotas (MtC per yr);

* No constraint when out of market

$Qta(t,r,s)\$(flag(t,r)=0)=Eref(t,r);$

* Kyoto protocol

$Qta('2010','CNZ',s)=168; Qta('2010','FSU',s)=1174;$

$Qta('2010','JAP',s)=256; Qta('2010','USA',s)=1283;$

$Qta('2010','WEU',s)=785;$

* Same quota in 2010 and 2020

$Qta('2020',r,s)\$(flag('2020',r)=1)=Qta('2010',r,s);$

Parameter pce(s) per capita emissions after 2050 (tC per person per yr)

/1 0.5

2 0.8

3 1.1/;

* Quota after 2050 depends on pop

$Qta(t,r,s)\$(ord(t)>6)=POPref(t,r)*pce(s);$

* Linear convergence from 2020 to 2050

$Qta(t,r,s)\$(ord(t)>4)*(ord(t)<7)=Qta('2020',r,s)+(ord(t)-4)/3*(Qta('2050',r,s)-Qta('2020',r,s));$