



SOCIÉTÉ D'INGÉNIERIE AVANCÉE

TYPE DE DOCUMENT

DCD

1, Rue de la Noé, BP 32104
44321 NANTES CEDEX 3
FRANCE
TEL 33(0)2 40 37 51 37
FAX 33(0)2 40 37 03 35
E-MAIL sitia@sitia.ec.nantes.fr

Référence du document : DCD ACOTRIS	ORGANISME REDACTEUR : SITIA	Date : 22/04/2002
Indice ou Variante : B		
Données d'entrée : Demande Subvention Référence :	ORGANISME EMETTEUR SITIA	Date : 08/09/2000

TITRE

DCD

Dossier de Conception Détaillée

**Projet ACOTRIS
Application Projet N° 2**

**Appareil propulsif d'un navire
à cycle combiné**

AUTEUR(S) : Pascal PICARD, Anthony MAYOU, David DELUCA	NB pages : 33 NB annexes : 03		
RESUME D'AUTEUR : Ce document a pour objet de présenter le DCD relatif à l'application projet N° 2 du projet ACOTRIS : Simulation du contrôle commande d'un appareil propulsif à cycle combiné.			
LISTE DE DIFFUSION : Diffusion Restreinte Restreinte : SITIA / CS / Chantiers de l'atlantique			
	REDACTEUR	VERIFICATEUR	APPROBATEUR
Noms :	David DELUCA	Pascal PICARD	Michel NAKHLE
Titres :	Stagiaire SITIA	Ingénieur	Coordonnateur de Projet
Dates :	22/04/2002	22/04/2002	29/04/2002
Signatures :			

SOMMAIRE

1. OBJET DU DOCUMENT.....	3
2. DOCUMENTS DE REFERENCE	3
3. PRESENTATION GENERALE	4
3.1 NOTATIONS.....	4
3.2 CONVENTION DE REPRESENTATION	4
4. MODELISATION	5
4.1 LES BALLONS VAPEUR	5
4.1.1 <i>Processus</i>	5
4.1.2 <i>Contrôle commande</i>	8
4.2 LE DEGAZEUR	10
4.2.1 <i>Schéma général</i>	10
4.2.2 <i>Processus</i>	11
4.2.3 <i>Contrôle commande</i>	13
4.3 LA TURBINE A GAZ (TAG).....	15
4.3.1 <i>Schéma général de la TAG</i>	15
4.3.2 <i>Processus</i>	18
4.3.2.1 <i>Turbo Compresseur</i>	18
4.3.2.2 <i>Turbine de puissance</i>	22
4.3.2.3 <i>Arbre</i>	23
4.3.3 <i>Contrôle commande</i>	25
4.3.3.1 <i>Contrôle de puissance</i>	25
4.3.3.2 <i>L'asservissement de vitesse de la Tag</i>	28
5. ANNEXES	29
5.1 INTERPOLATION ET EXTRAPOLATION DES ABAQUES	29
5.2 TABLES $CTU=F(QMF,NPT)$; $PHP=F(QMF,NPT)$; $THP=F(QMF,NPT)$	29
5.3 TABLE $CPT=F(PHP,NHP)$	31

1. Objet du document

Ce document a pour objet de présenter le DCD relatif à l'application projet N° 2 du projet ACOTRIS : Simulation du contrôle commande d'un appareil propulsif.

2. Documents de référence

- [1] Document LES CHANTIERS DE L'ATLANTIQUE : Schémas fonctionnels des circuits eau et vapeur relatifs au R31 :
- VVV rév. D
 - AAA rév. E
 - ACC rév. F
- [2] Document LES CHANTIERS DE L'ATLANTIQUE : RCI - CELEBRITY CRUISE - SHIPS MILLENIUM CLASS - AUTOMATION - STEAM PLANT – Références : M00 E 922 – Var 1 - Ind 0 - M00 E 928 – Var - Ind F.
- [3] Document DELTAK : Chaudières récupératrices – Caractéristiques – Performance and data.
- [4] Document DELTAK : Turbine Gaz et Chaudière – Matériel – Project equipment specification.
- [5] Document DELTAK : Process Flows Data Sheet – Drawing number : 02002868 – Rev : C.
- [7] Document DELTAK : HRSG Function Diagrams.
- [8] Document COPES – VULCAN Ltd : Valve lift to inlet steam flow algorithm – 09/12/99 – Rev 00.
- [9] Document LES CHANTIERS DE L'ATLANTIQUE : Étude de la régulation des chaudières récupératrices pour les navires du type MILLENIUM – Cahier Des Charges (CDC) - de référence STP - EFAU00 161R31 - N° : 4400 000.
- [10] Document SITIA : Documentation de conception détaillée de la partie modélisation.
- Principal
 - Annexes (Valeurs numériques).
- (document TAG interne).
- [11] Document SITIA : Formation sur l'utilisation des modèles et du simulateur développés (document TAG interne).
- [12] Document LES CHANTIERS DE L'ATLANTIQUE : COGES - Cycle en combiné.
- [13] Document SITIA : DCP Appareil propulsif d'un navire à cycle combiné. Indice B.
- [50] Document SITIA : HRSGs LOT1 – Analyse du process et définition des essais en boucle fermée – Réf : CA/HRSGs/LOT1.
- [51] Document SITIA : HRSGs LOT2 – Résultats et analyse des essais en boucle fermée réalisés sur le navire S31 INFINITY – Réf : CA/HRSGs/LOT2.

3. Présentation générale

Le process est principalement constitué des éléments suivants :

- Deux turbines à gaz (TAG)
- Deux alternateurs
- Deux chaudières récupératrices (HRSGs) comportant chacune un surchauffeur, un évaporateur, un économiseur et un ballon vapeur
- Un collecteur
- Une turbine à vapeur (TAV) (couplée sur un système : réducteur et alternateur)
- Un condenseur atmosphérique
- Un dégazeur
- Les systèmes de régulation (un automate régulateur par turbine)

3.1 Notations

On utilise les notations suivantes pour le cycle vapeur :

Qv	:	débit vapeur
Qea	:	débit d'eau alimentaire
Qcond	:	débit vapeur au condenseur
QvTV	:	débit vapeur à la turbine vapeur (TV)
Qcir	:	débit circulation
Tc1	:	température vapeur collecteur 1 (après désurchauffe)
Pb	:	pression ballon
Pc1	:	pression au collecteur 1 (vapeur surchauffée)
Nb	:	niveau ballon
Nbc	:	consigne niveau ballon
Nd	:	niveau dégazeur
Ndc	:	consigne niveau dégazeur

3.2 Convention de présentation

D'une façon générale, sur les schémas des processus,

- les variables (**en rouge**) soulignées représentent les grandeurs d'entrée (au sens de l'automatique) du bloc considéré
- les variables non soulignées représentent des grandeurs de sortie pour le bloc considéré

4. Modélisation

4.1 Les ballons vapeur

4.1.1 Processus

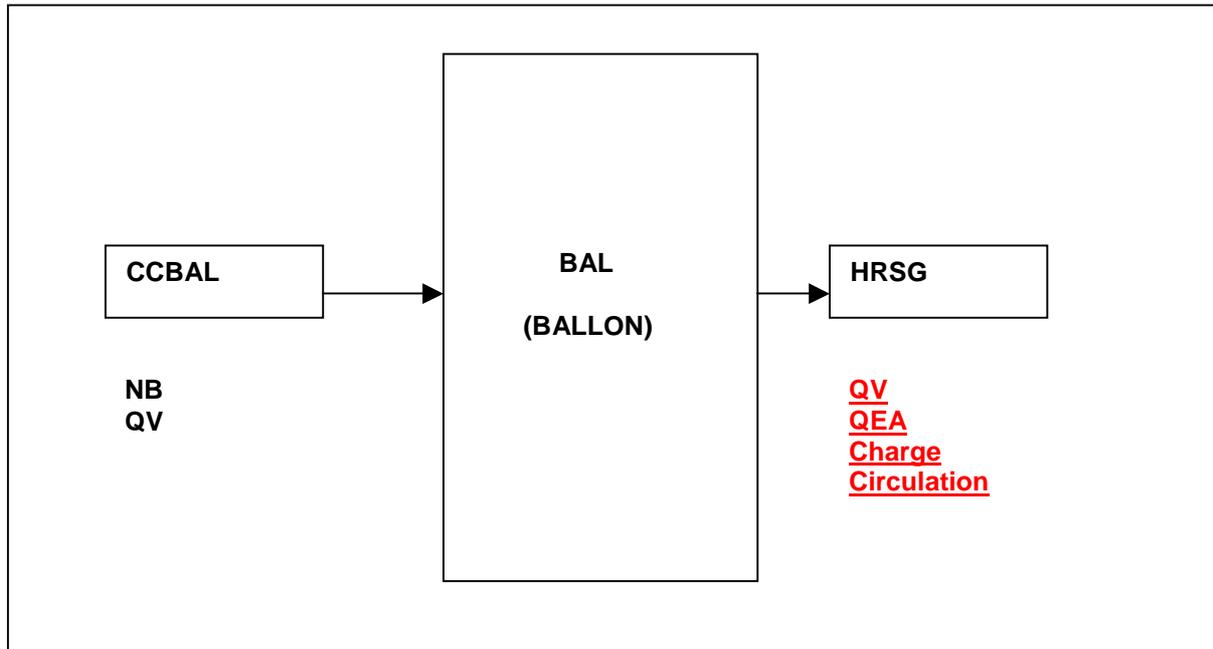


Fig. 4.1.1

Rôle :

Il permet de stocker l'eau et la vapeur du circuit. Le débit d'eau alimentaire régule le niveau d'eau dans le ballon. Le système est perturbé par le débit vapeur, la charge et le débit de circulation.

Schéma général :

- Seul le cas de la régulation "3 éléments" est représenté.
- Les perturbations directes sur le niveau ballon sont représentées par les lignes brisées (charge, débit circulation, débit vapeur).
- Le débit vapeur, étant une perturbation forte, est mis en tendance dans la boucle de régulation.
- La boucle cascade permet de linéariser le fonctionnement de la vanne.

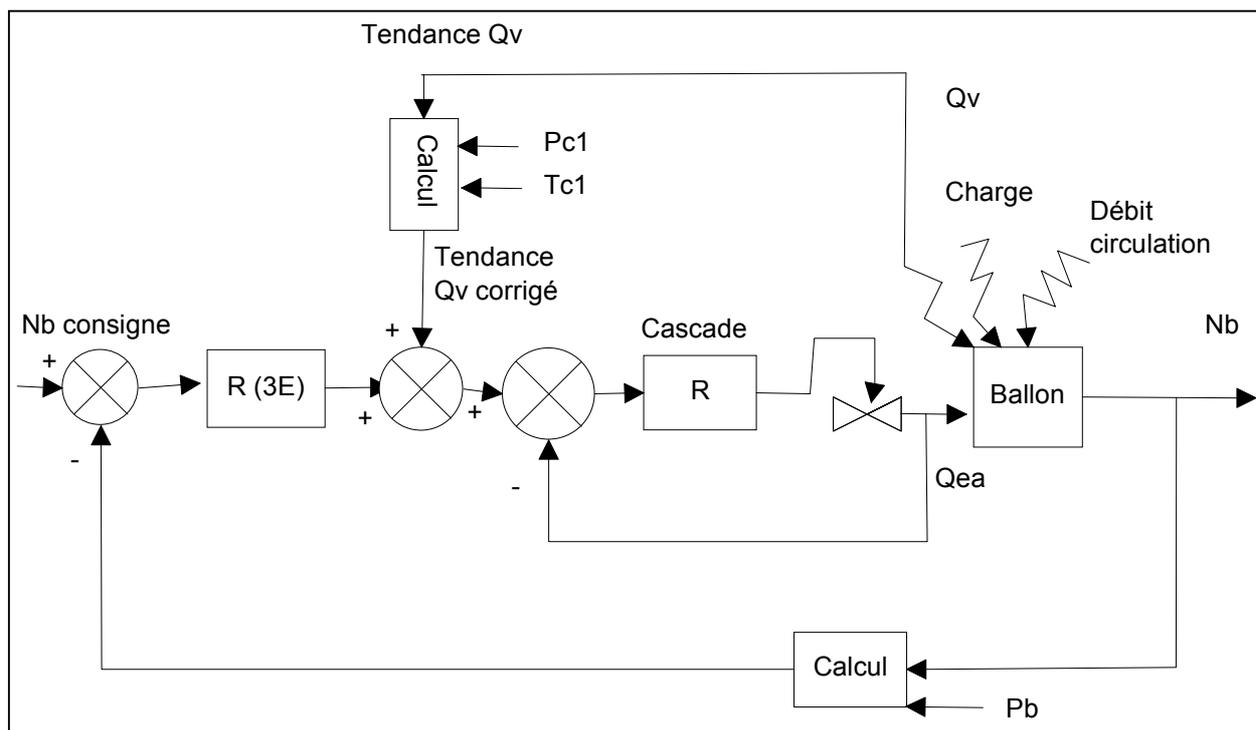


Fig. 4.1.2

Type de modélisation utilisée:

Modèle de connaissance

/

Modèle de comportement

- ◆ Identification à partir des relevés expérimentaux des fonctions de transfert Niveau / Débits
 $F(p)=NB/QEA$ $G(p)=NB/QV$.

Entrées – Sorties – Paramètres du Ballon :

Variables d'entrée :	Valeurs initiales de simulation		
QEA	0	(t/h)	Débit d'eau alimentaire.
QV	0	(t/h)	Débit vapeur.
Charge	0	(mm)	Perturbation du niveau d'eau.
Circulation	0	(mm)	Perturbation du niveau d'eau lié au circuit de circulation.
Variables de sortie:			
NB	0	(mm)	Niveau de l'eau dans le ballon.
Paramètres globaux :	Valeurs de simulation		
Kg	0.001019		Gain statique de la FT : NB/QEA.
Gb3	43.43		Coefficient b3 du dénominateur de NB/QEA.
Gb2	34.832		Coefficient b2 du dénominateur de NB/QEA.
Gb1	1		Coefficient b1 du dénominateur de NB/QEA (a0=0).
KcorG	29.61	mm/(t/h)	Gain de correction pour obtenir l'unité t/h.
Kf	0.0302	mm/(t/h)	Gain statique de la FT NB/QV.
To	414.2	(sec.)	Constante de temps du minimum de phase.
Fb3	43.43		Coefficient b3 du dénominateur de NB/QV.
Fb2	34.832		Coefficient b2 du dénominateur de NB/QV.
Fb1	1		Coefficient b1 du dénominateur de NB/QV.

Equations du système :

- ◆ Identification de la fonction de transfert NB/QEA
Celle-ci est obtenue à partir de résultats expérimentaux.
$$NB/QEA=G(P) = K_g \cdot K_{corG} / [G_{b3} \cdot p^3 + G_{b2} \cdot p^2 + G_{b1} \cdot p]$$
où p désigne la variable de Laplace.
- ◆ Identification de la fonction de transfert NB/QV
Celle-ci est obtenue à partir de résultats expérimentaux.
$$NB/QV=F(P) = K_f [1 - T_o \cdot p] / [G_{b3} \cdot p^3 + G_{b2} \cdot p^2 + G_{b1} \cdot p]$$
où p désigne la variable de Laplace.
- ◆ Identification de la fonction de transfert NB/ Charge
En attente d'informations.
- ◆ Identification de la fonction de transfert NB / Débit Circulation
En attente d'informations.

Identification des paramètres :

Les paramètres globaux précédents sont obtenus par identification des relevés expérimentaux d'après les variables NB et NBC mesurées dans le temps. Les intégrateurs présents dans les fonctions de transferts ne permettent qu'une identification en boucle fermée du système. On n'a pas de modèle de la vanne 6100 et on ne connaît pas l'unité de la valeur de sortie du PID. Par contre, on connaît l'allure des fonctions de transferts F(p) et G(p) et on connaît les valeurs numériques des coefficients Kp et Ti de la partie contrôle / commande. On peut déterminer les coefficients des fonctions F(p) et G(p) avec $F(P) = NB / \text{"Sortie PI"}$. On rajoute un gain KcorG dans la fonction G(p) pour retrouver $G(p)=NB / QEA$. Comme les débits d'eau et de vapeur sont dans la même unité, on peut calculer KcorG en utilisant les gains statiques de F et G : $K_{corG} = K_f / K_g = 29.61$. Pour compenser, on rajoute un gain de valeur $1/K_{corG}$ après le correcteur PI.

Ce type de méthodologie est expliqué dans le document de référence [51].

4.1.2 Contrôle commande

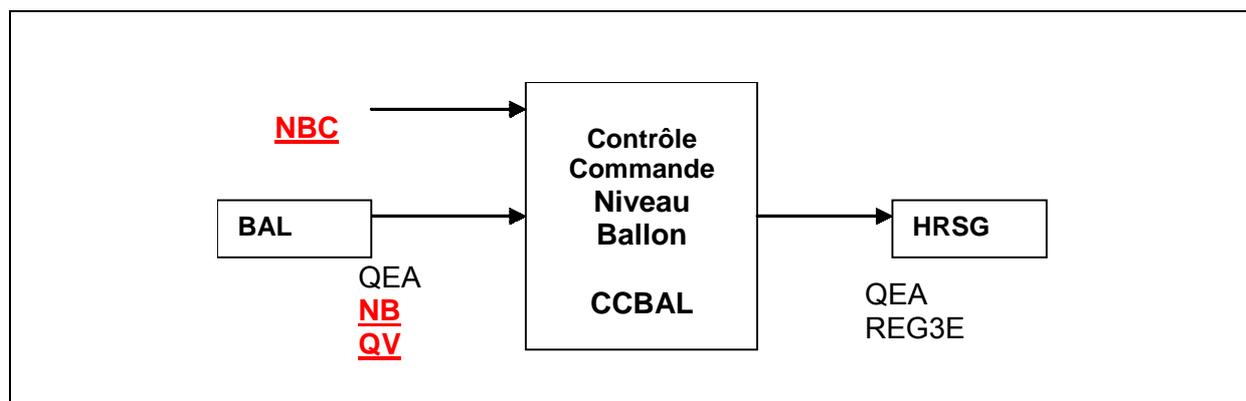


Fig. 4.1.3

Rôle :

Le contrôle / commande (CC) permet d'asservir et de réguler le niveau du ballon à une consigne d'entrée. On compare la mesure directe du niveau d'eau à la consigne. L'écart entre ces grandeurs, corrigé par un PID, permet de définir le débit alimentaire QEA. La modélisation de la vanne 6100 et de sa régulation est incluse dans la modélisation du ballon, on va en tenir compte en utilisant un gain correcteur dans le PID égal à $1/K_{corG}$.

Type de modélisation utilisée :

Modèle de connaissance:

Action d'un correcteur PID dans la chaîne de commande d'un système.

Modèle de comportement:

/

Entrées – Sorties – Paramètres du contrôle / commande:

Variables d'entrée :	Valeurs initiales de simulation		
NBCONSIGNE	-30	(mm)	Niveau d'eau désiré dans le ballon.
QV	0	(t/h)	Débit vapeur.
Variables de sortie :			
QEA	0	(t/h)	Débit d'eau alimentaire.
REG3E	0	(booleen)	égale à 1 si régulation 3 éléments, 0 sinon.
Paramètres globaux :			
Valeurs de simulation			
Kp	6		Gain correcteur PI// 3 éléments.
Ti	150	(sec.)	Composante intégrale PI // 3 éléments.
KcorG	29.61	mm/(t/h)	Gain (inverse) de correction.
NBSEUILQV1E3E	17	(t/h)	Seuil de passage 1 ou 3 éléments.

Equations :

◆ Calcul de la loi de commande :

Dans la pratique, on ne peut pas mesurer correctement de faible débit de vapeur. On envisage donc deux types de commande pour régler le débit d'eau alimentaire :

La première résulte du régulateur et de l'action de la tendance pour de forts débits de vapeur.
 $QEA = (1/K_{corG}) * [Kp + 1/(Ti * p)] * [NB_{CONSIGNE} - NB] + QV$.
Cette commande est dite à trois éléments (Correcteur, tendance QV et linéarisation de la vanne).

La seconde ne comporte pas de tendance QV dans la boucle de régulation, on l'utilise pour des débits de vapeur inférieurs à $NB_{SEUILQV1E3E} = 17 \text{ t/h}$:

$$QEA = (1/K_{corG}) * [Kp + 1/(Ti * p)] * [NB_{CONSIGNE} - NB]$$

Cette commande est dite à un élément (le correcteur). Il n'y a pas de tendance QV et la vanne est actionnée en boucle ouverte (On ne sait pas mesurer les faibles débits d'eau et on suppose que le fonctionnement de la vanne est linéaire pour de faibles débits).

◆ Coefficients du régulateur PID :

$$PID : [Kp + 1/(Ti * p)] \text{ avec } Kp=6 \text{ et } Ti=150.$$

◆ Indicateur booléen de sortie :

$$\begin{array}{ll} REG3E = 1 & \text{Si } QV > NB_{SEUILQV1E3E} \\ = 0 & \text{Sinon} \end{array}$$

4.2 Le dégazeur

4.2.1 Schéma général

La boucle est présentée dans le cas de la régulation à 3 éléments.

- Les perturbations directes sur le dégazeur représentées par les lignes brisées (Débits d'eau alimentaire).
- Le débit d'eau alimentaire, qui est une perturbation forte, est mis en tendance dans la boucle de régulation.

La boucle cascade permet de linéariser le fonctionnement de la vanne par asservissement.

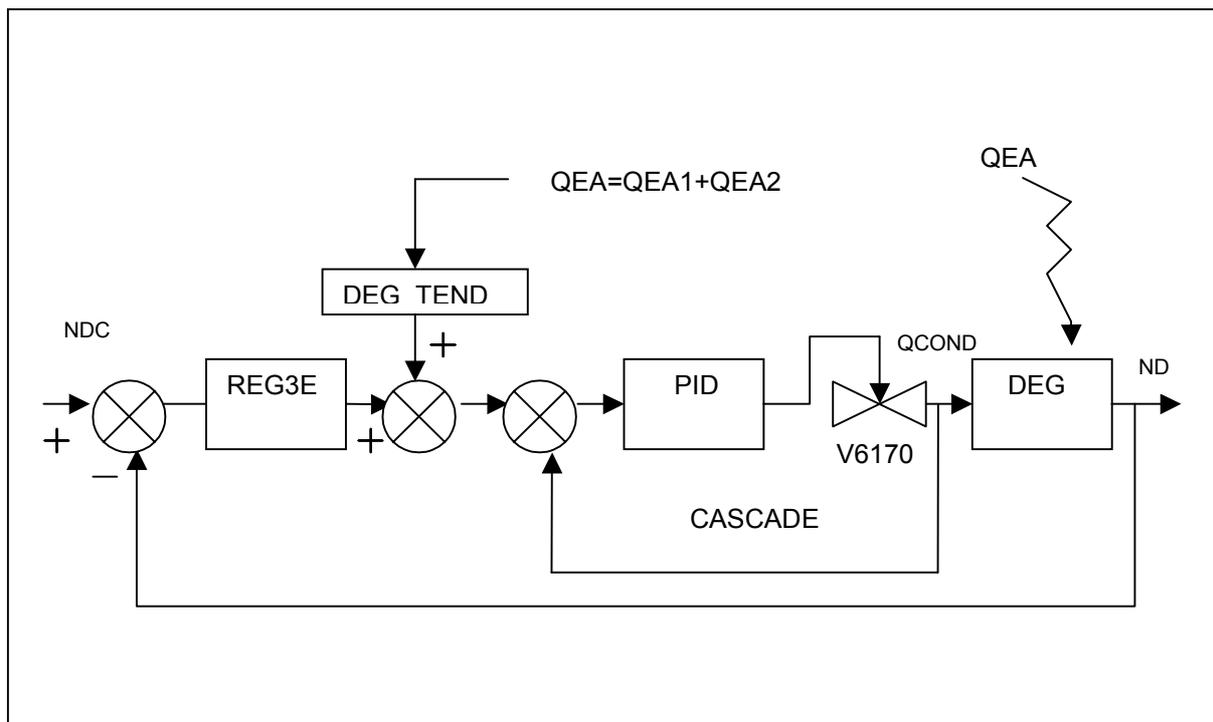


Fig. 4.2.1

4.2.2 Processus

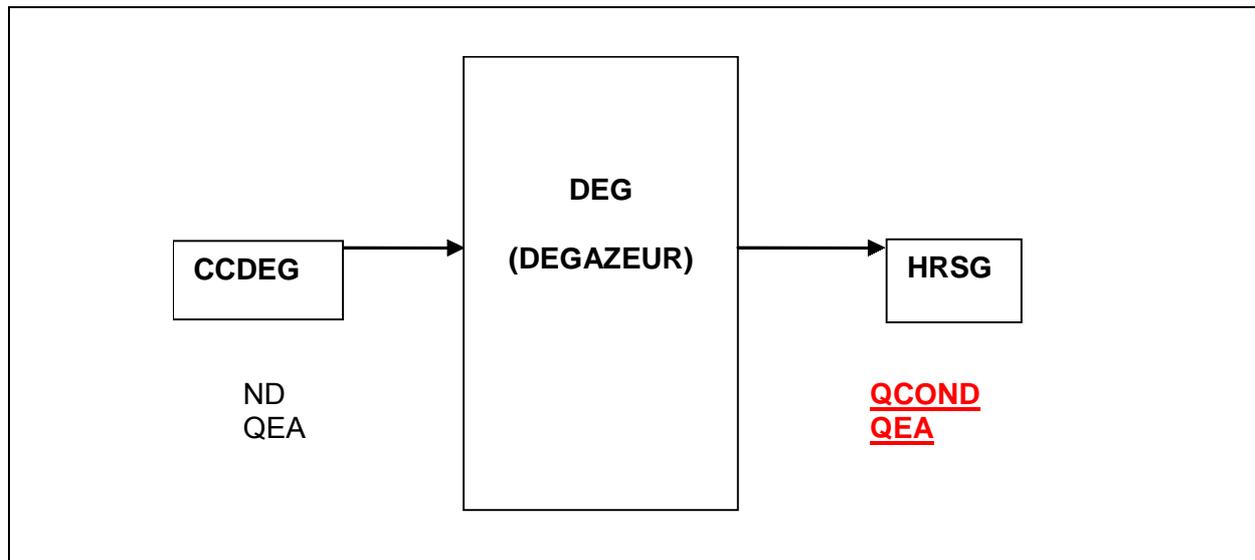


Fig. 4.2.2

Rôle :

Le dégazeur constitue la dernière réserve d'eau avant la chaudière. Il a pour fonction de désoxygéner l'eau et de la réchauffer. L'apport d'énergie réchauffant l'eau est assuré par un débit de vapeur négligeable dans notre étude (non modélisé). On ne considérera donc que le débit d'eau extrait des condenseurs QCOND et le débit d'eau alimentaire des ballons QEA.

Entrées / Sorties :

Variables d'entrée	Unité	Description
QEA	t/h	Débit d'eau alimentaire.
QCOND	t/h	Débit provenance condenseur transitant par la vanne V6170
Variables de sortie	Unité	Description
ND	mm	Niveau de l'eau dans le dégazeur

Paramètres :

Paramètres globaux	Valeurs de simulation	Unité	Description
DEG_Kg	0.025	mm / (t/h)	Gain statique de la FT ND/QCOND
DEG_Tg	1	Seconde	Constante de temps de la FT ND/QCOND
DEG_Kf	0.025	mm / (t/h)	Gain statique de la FT ND/QEA
DEG_Tf	1	Seconde	Constante de temps de la FT ND/QEA
DEG_TEND	0.7		Gain de la tendance

Type de modélisation :

Modèle de représentation

Identification à partir des relevés expérimentaux des fonctions de transfert Niveau / Débits

$$F(p)=ND/QEA \text{ et } G(p)=ND/QCOND$$

Hypothèses :

- La section du dégazeur est supposée constante (autour du point de fonctionnement)
- Les aspects thermodynamiques n'étant pas directement pris en compte dans notre modélisation, on considère le débit vapeur (apport d'énergie) dégazeur négligeable devant les autres débits.
- Les phénomènes de gonflement et de tassement sont négligeables (pression faible) : pas de terme de non-minimum de phase

Équations :

Identification de la fonction de transfert ND/QEA

$$F(p) = DEG_Kf / [p(1+DEG_Tf.p)]$$

Identification de la fonction de transfert ND/QCOND

$$G(p) = DEG_Kg / [p.(1+DEG_Tg.p)]$$

Identification des paramètres :

Les méthodes d'identification du type de celles utilisées par le processus ballon (méthode du maximum de vraisemblance sur modèle d'état avec conditions initiales) n'ont pas donné de résultats satisfaisants pour le dégazeur en raison des résultats d'essais difficilement exploitables. D'autres méthodes ont été utilisées.

- La modélisation est faite à partir de relevés liés au document de référence [51]. L'essai 21 que l'on peut considérer comme un essai en boucle ouverte, (réponse du niveau ND à un échelon de consigne QCOND à QEA constant) nous permet d'obtenir DEG_Kg et DEG_Tg (voir document HRSGs-LOT2 p16 et 29). On obtient ainsi DEG_Kg=0.025 et DEG_Tg#1 seconde.

Remarques :

- La valeur de DEG_Kg trouvée nous permet d'obtenir la valeur approximative de la surface du dégazeur S : $S=(1/DEG_Kg)*K$ avec $K=0.278(=1000/3600)$: coefficient de correction pour retomber sur l'unité [SI]. On obtient une surface de dégazeur $S=11.12 \text{ m}^2$ soit un rayon de 1.88m.
- La constante de temps de l'ordre de la seconde correspond aux dynamiques des vannes.
- Le gain statique de $F(p)=ND/QEA$ est approximativement le même que celui de $G(p)$: DEG_Kf=0.025
- Pour DEG_Tf on prend une valeur du même ordre de grandeur que DEG_Tg : DEG_Tf=1 seconde
- Le gain de la tendance DEG_TEND est égal à $|F(p)/G(p)|$, proche de 1. DEG_TEND=0.7

4.2.3 Contrôle commande

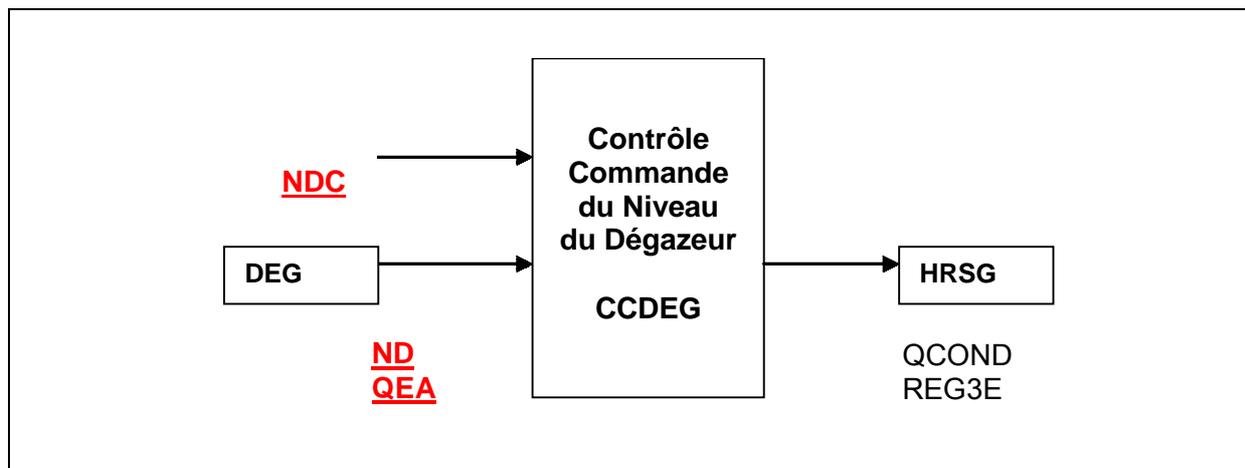


Fig. 4.2.3

Rôle :

Le contrôle / commande (CC) permet d'asservir et de réguler le niveau du dégazeur à une consigne d'entrée. On compare la mesure directe du niveau d'eau à la consigne. L'écart entre ces grandeurs, corrigé par un PID, permet de définir le débit alimentaire en provenance du condenseur (vanne 6170).

Entrées / Sorties :

Variables d'entrée	Unité	Description
NDC	mm	Niveau d'eau désiré dans le dégazeur
QEA	t/h	Débit d'eau alimentaire
ND	mm	Niveau d'eau mesuré dans le dégazeur
Variables de sortie:	Unité	Description
QCOND	t/h	Débit eau provenance condenseur
REG3E		(Booléen) = 1 SI régulation 3 éléments ; 0 SINON.

Paramètres :

Paramètres globaux	Valeurs de simulation	Unité	Description
Kp	6		Gain correcteur PI// 3 éléments
Ti	150	S	Composante intégrale PI // 3 éléments
1 / DEG_KcorG	1/8		Gain de correction de calibrage du signal issu du PI
NDSEUILQEA3E	30	t/h	Seuil de passage 1 ou 3 éléments

Type de modélisation :

Modèle de connaissance

Action d'un correcteur PID dans la chaîne de commande d'un système.

Équations :

Calcul de la loi de commande

Dans la pratique, on ne peut pas mesurer correctement de faibles débits. On envisage donc deux types de lois de commande pour régler le débit en provenance des condenseurs QCOND.

1. Régulation 3E (3 éléments)

La première résulte du régulateur et de l'action de la tendance pour de forts débits d'eau alimentaire. Cette commande est dite à trois éléments (Correcteur, tendance QEA et asservissement de la vanne).

SI QEA > NDSEUILQEA3E

$$QCOND = (1/DEG_KcorG) * [Kp + 1/(Ti*p)] * [NDC - ND] + QEA$$

2. Régulation 1E (1 élément)

On l'utilise pour des débits d'eau alimentaires inférieurs à NDSEUILQEA1E3E.

Cette commande est dite à un élément (le correcteur). Il n'y a pas de tendance QEA et la vanne est actionnée en boucle ouverte (on ne sait pas mesurer les faibles débits d'eau et on suppose que le fonctionnement de la vanne est linéaire pour de faibles débits).

SI QEA < NDSEUILQEA3E

$$QCOND = (1/DEG_KcorG) * [Kp + 1/(Ti*p)] * [NDC - ND]$$

Indicateur booléen de sortie

SI QEA > NDSEUILQEA3E

$$REG3E = 1$$

SINON

$$REG3E = 0$$

Identification des paramètres

- Coefficients du régulateur PID : $Kp + 1/(Ti.p)$: $Kp=6$ et $Ti=150$
- Seuil de changement de régulation : NDSEUILQEA3E :
NDSEUILQEA3E = 30%.QEA nominal = 30 t/h
- Le facteur de correction DEG_KcorG permet de calibrer le signal de sortie du PI (changement d'unités)

4.3 La Turbine à Gaz (TAG)

4.3.1 Schéma général de la TAG

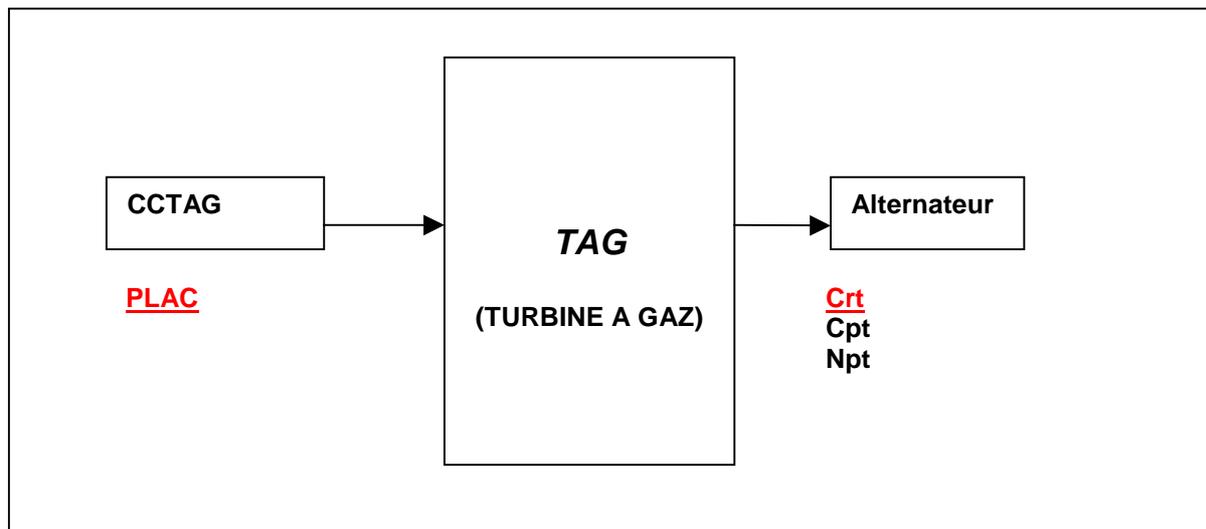


Fig. 4.3.1

Généralités :

D'après le document COGES Cycle combiné, la TAG possède la même structure et les mêmes caractéristiques techniques que dans le modèle interne à SITIA. Le compresseur a une vitesse nominale de 10000 tr/min, la turbine de puissance délivre 25 MW sur l'arbre de sortie à 3600 tr/min. On peut donc envisager de reprendre les mêmes valeurs numériques et éventuellement de les modifier pour adapter le système.

Par contre, la charge est différente ; elle entraîne ici directement l'arbre d'un alternateur. La charge mécanique qu'il constitue est liée à la puissance électrique qu'il génère. A priori, on peut se passer d'un embrayage d'arbre à condition de pouvoir contrôler la charge électrique. Dans le modèle interne, la charge est constituée de la ligne d'arbre de l'hélice (couplée par le biais d'un réducteur et d'un embrayage) qui impose à la turbine de puissance sa vitesse de rotation. Cette différence de fonctionnement est fondamentale.

L'alternateur fonctionne sous une vitesse nominale de 3600 tr/min, il est important de maintenir cette vitesse constante car elle détermine la fréquence des courants électriques. On peut considérer que l'alternateur constitue un couple résistant sur l'arbre de sortie de la TAG. La vitesse de rotation de l'ensemble n'est a priori imposée que par la valeur de ce couple et par la valeur de l'angle du levier de commande de puissance. On pourra envisager une régulation de cette vitesse autour de la valeur nominale par action sur l'angle du levier. C'est le bloc contrôle / commande du système.

On connaît aussi la valeur du rendement de la TAG en interprétant les valeurs numériques du débit de combustible et du produit vitesse / couple de l'arbre de sortie. Elle ne dépasse pas 36 % sous la puissance nominale. Une grande partie des pertes se retrouve sous forme de chaleur à l'échappement, d'où l'intérêt d'en récupérer une partie dans un circuit vapeur.

La simulation dynamique de la TAG ne concerne que la partie mécanique de production d'énergie. On ne connaît pas la valeur de la puissance thermique en sortie de la turbine de puissance. Hors les gaz chauds de l'échappement sont récupérés dans les chaudières afin de créer un circuit vapeur sous haute pression destiné à alimenter une turbine à vapeur d'une puissance de 9MW.

La pression et la température des gaz de sortie ne sont pas précisés dans le modèle mais on connaît d'autres variables : la pression et la température des gaz de sortie du turbo ainsi que la puissance mécanique de sortie TAG.

La connaissance de la quantité de chaleur en sortie ainsi que le modèle des chaudières récupératrices permettront de modéliser le régime de la TAG sous forme de perturbations du circuit vapeur.

Rôle :

Les turbines à gaz sont les convertisseurs d'énergie du navire, elles produisent de la puissance sous deux formes : mécanique et thermique. La puissance mécanique nominale d'une TAG est de 15 MW, elle permet d'entraîner un alternateur par le biais de l'arbre moteur de sortie. L'énergie thermique issue des gaz chauds de la sortie de la turbine est récupérée dans des chaudières puis convertie en vapeur haute pression, ceci permet d'augmenter le rendement global du système.

Schéma général :

- Le schéma interne de la TAG contient les sous modèles correspondants aux organes principaux des turbines.
- Seule la partie de production de puissance mécanique est modélisée.
- Le système de démarrage de la TAG (à l'aide d'un moteur électrique) est modélisé.
- La perturbation Crt est modélisée par un couple résistant sur l'arbre de sortie.
- La grandeur de sortie de la TAG est la puissance de sortie sur l'arbre (W).

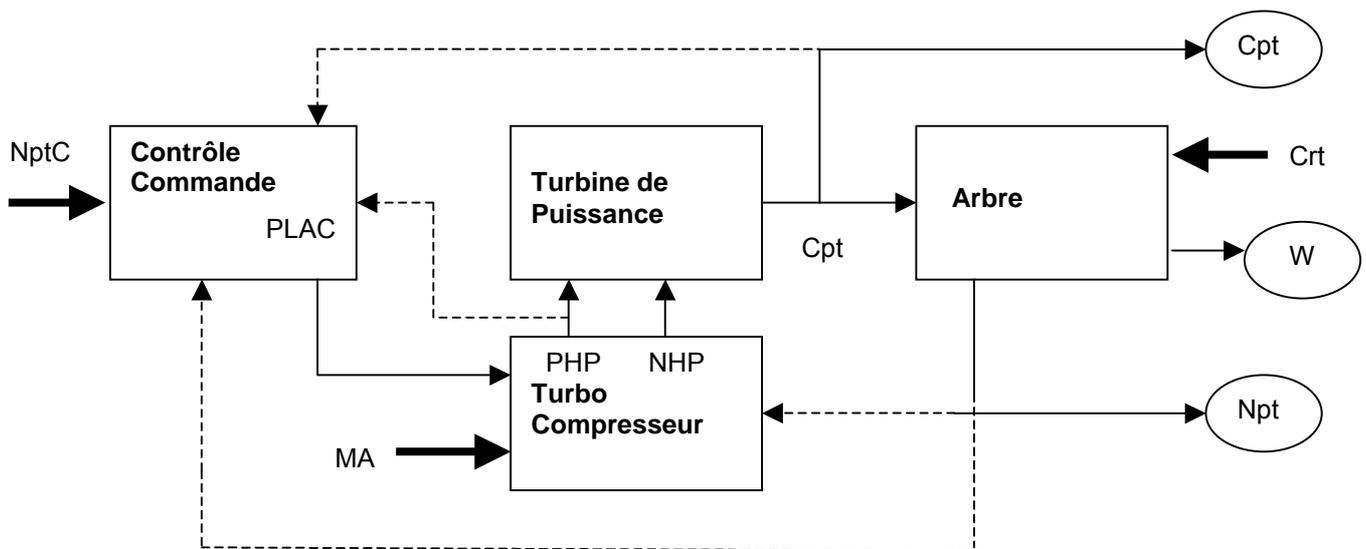


Fig. 4.3.2

Type de modélisation utilisée :

Modèle de connaissance

Les organes mécaniques constitutifs principaux et les grandeurs caractéristiques de la turbine à gaz.

Modèle de comportement

/

Entrées – Sorties – Paramètres de la turbine à gaz :

Variables d'entrée :	Valeurs initiales de simulation		
PLA	0	(Degrés)	Angle du levier de commande de puissance.
MA	1	(booléen)	Commande de marche / arrêt de la TAG.
Crt	0	(N.m)	Couple résistant de charge sur l'arbre de sortie.
Variables de sortie :			
Npt	0	(tr/min)	Vitesse de rotation de l'arbre de sortie .
Cpt	0	(N.m)	Couple moteur de l'arbre de sortie.
W	0	(MWatts)	Puissance de sortie de la TAG.
Variables de liaisons :			
PHP	P0	(Bars)	Pression des gaz de sortie du turbo.
NHP	0	(tr/min)	Vitesse de rotation du turbo.
Cpt	0	(N.m)	Couple moteur de la turbine de puissance.
PLAC	0	(Degrés)	Angle corrigé du levier de commande.
Paramètres globaux :			
/			

4.3.2 Processus

4.3.2.1 Turbo Compresseur

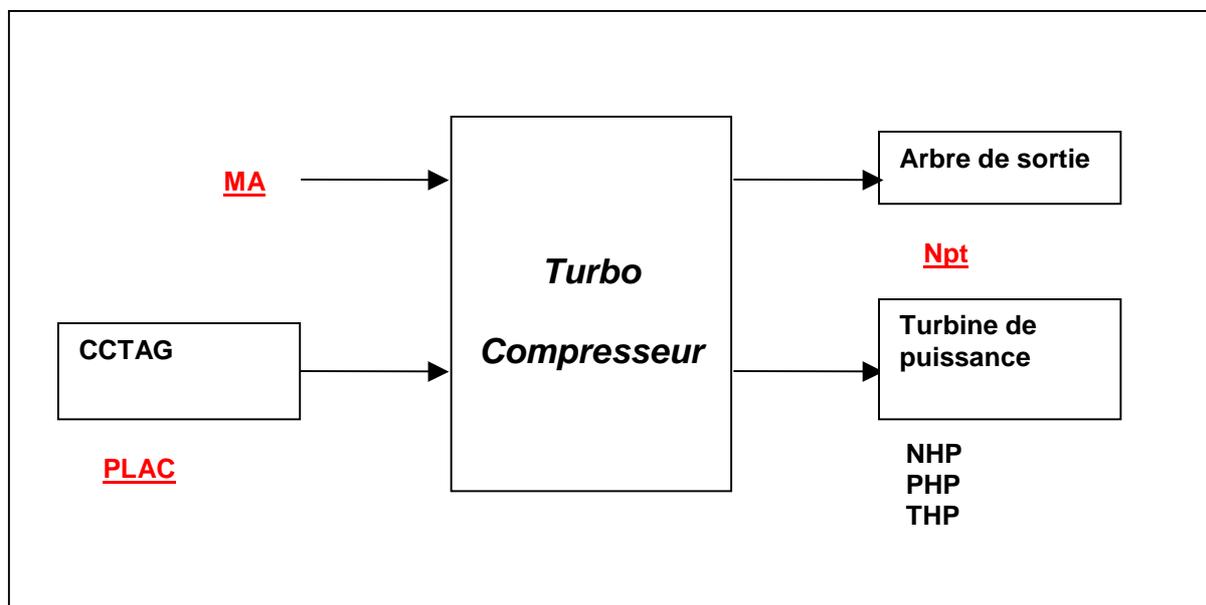


Fig. 4.3.3

Rôle :

Le Turbo Compresseur est un sous-ensemble important de la TAG. Son rôle est de transformer le mélange air / combustible en gaz haute pression afin d'alimenter la turbine de puissance. Ce bloc contient les sous modèles suivants : Calcul du débit combustible, calcul du couple moteur et du couple résistant (arbre compresseur), calcul de la vitesse de rotation associée et calcul de la pression et de la température des gaz de sortie du turbo. Une modélisation de démarreur électrique de la turbine haute pression est également intégrée au dispositif.

Schéma général :

- Les sous-ensembles de calcul des grandeurs internes du turbocompresseur sont effectués à partir d'abaques ou de fonctions polynomiales connues.
- La variable booléenne de Marche / Arrêt permet de couper le débit de combustible afin d'arrêter la TAG.
- Le dispositif de démarrage est modélisé par un couple moteur constant appliqué sur l'arbre du turbo jusqu'à un certain régime.
- La loi de calcul du débit de combustible QMF est une fonction de l'angle du levier de puissance. Cette loi se modifie en fonction du régime de la turbine de puissance.

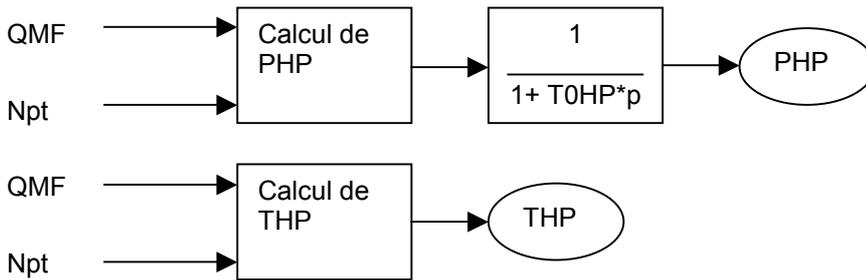
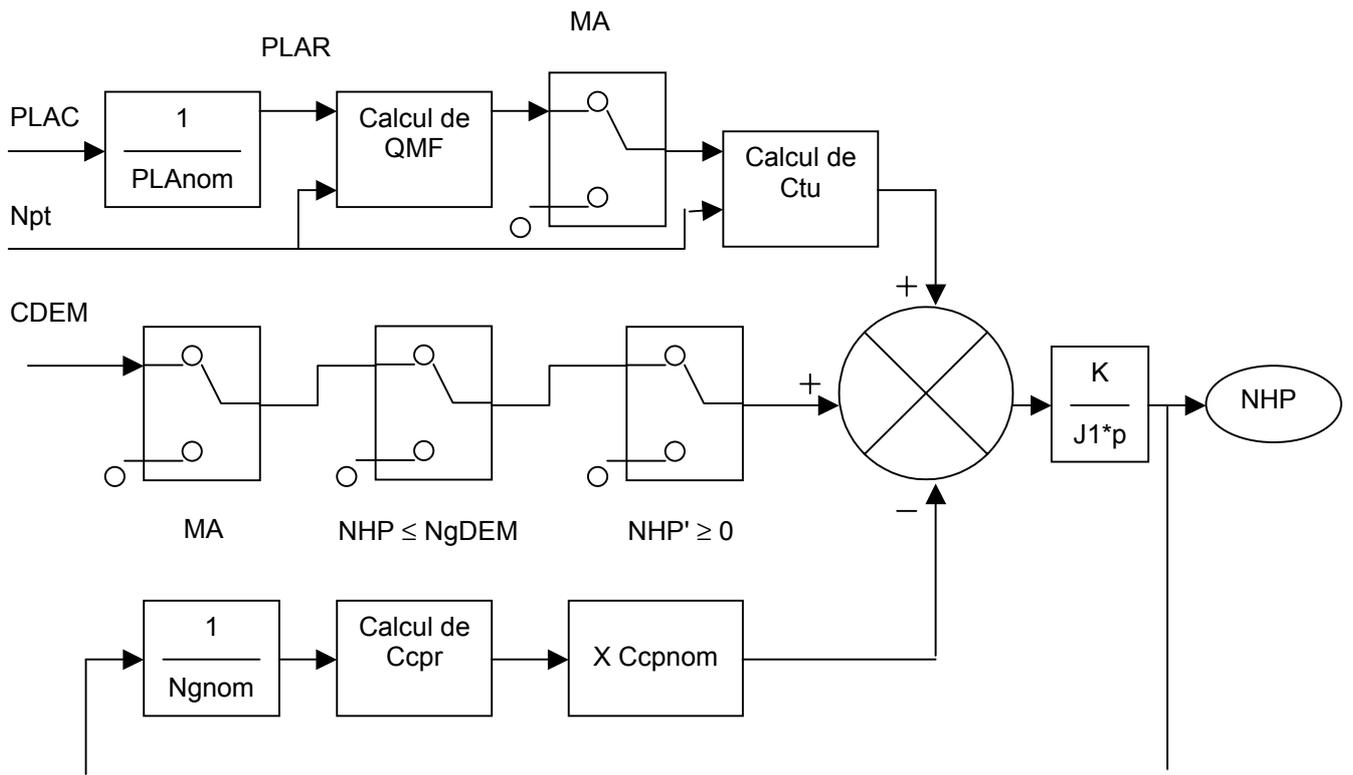


Fig. 4.3.4

Type de modélisation utilisée :

Modèle de connaissance
/

Modèle de comportement

Les données internes à SITIA avec les fonctions et abaques numériques associées.

Entrées – Sorties – Paramètres du turbo – compresseur :

Variables d'entrée :	Valeurs initiales de simulation		
PLAC	0	(Degrés)	Angle corrigé du levier de commande de puissance.
MA	1	(booléen)	Interrupteur de Marche / Arrêt.
Npt	0	(tr/min)	Vitesse de rotation de l'arbre de sortie TAG.
Variables de sortie :			
NHP	0	(tr/min)	Vitesse de rotation de la turbine du turbo compresseur.
PHP	P0	(Bars)	Pression des gaz à la sortie du turbo.
THP	T0	(°C)	Température des gaz en sortie du turbo.

Variables locales :	Valeurs initiales de simulation		
QMF	0	(Kg/h)	Débit de combustible.
Ctu	0	(N.m)	Couple moteur de la turbine du turbo compresseur.
Ccp	0	(N.m)	Couple résistant de la turbine du turbo compresseur.
CcpR	0		Couple ccp réduit.
PLAR	0		Commande PLA réduite.
NHPR	0		Vitesse réduite du turbo compresseur
CNHP	0		Drapeau indiquant la limite vitesse pour le démarrage
CNHPD	0		Drapeau indiquant le sens de variation de la vitesse
Paramètres globaux :	Valeurs de simulation		
PLAnom	130	(Degrés)	Angle nominale du levier de puissance.
Nptnom	3600	(tr/min)	Vitesse de rotation nominale de l'arbre.
NHPnom	10000	(tr/min)	Vitesse de rotation nominale du compresseur.
Ccpnom	50000	(N.m)	Couple résistant compresseur nominale.
Cdem	2500	(N.m)	Couple moteur de lancement (au démarrage).
NHPdem	4500	(tr/min)	Seuil de coupure du moteur de lancement.
Tqmf	0.7	(sec.)	Constante de temps du débit de combustible.
T0HP	2	(sec.)	Constante de temps d'établissement de la pression.
J1	26	(Kg.m ²)	Inertie de l'arbre (turbine HP).
K	60 / 2π	(tr/min)/(rad/sec.)	Coefficient de conversion de vitesse.
P0	1.013	(Bars)	Pression atmosphérique
T0	15	(°C)	Température
a01	22.7546		Coef. du polynôme de calcul de CcpR.
a11	-39.4867		
a21	22.984		
a31	-4.3871		
a02	-83.8072		
a12	207.2613		
a22	-166.783		
a32	44.0925		
a03	-36.1307		
a13	85.4121		
a23	-62.9977		
a33	14.6351		
b0	531.6		Coef. du polynôme de calcul de QMF (faible régime).
b1	2874.8		
b2	-71.7		
b3	117.6		
c00	0		Coef. du polynôme de calcul de QMF (fort régime).
c01	-3382		
c02	2637		
c03	1281		
c04	-321		
c10	-8553		
c11	1990		
c12	20253		
c13	-10115		
c14	1973		

Equations du système :

- Equations :

Calcul de PLAR : $PLAR = PLAC / PLANom.$

Calcul de QMF : Si $MA = 1$ alors $QMF = QMF(PLAR, Npt) / (1 + (p * Tqmf))$
sinon $QMF = 0$

Calcul de Ctu : $Ctu = Ctu(QMF, Npt)$

Calcul de NHP : $CNHP = 1$ si $NHP \leq NHPDEM$
 $= 0$ sinon.

$CNHPD = 1$ si $NHP' \geq 0$
 $= 0$ sinon.

$NHP = (K / J1 * p) * [Ctu - Ccp + Cdem * MA * CNHP * CNHPD]$

Calcul de NHPR : $NHPR = NHP / NHPnom$

Calcul de Ccp : $Ccp = CcpR * Ccpnom$

Calcul de CcpR : $CcpR = a0n * NgR^3 + a1n * NgR^2 + a2n * NgR + a3n$

NOTA : Notation $Ng = NHP$

Calcul de PHP : $PHP = PHP(QMF, Npt) / (1 + p * T0HP)$

Calcul de THP : $THP = THP(QMF, Npt)$

- Abaques et coefficients :

Coefficients $a0n, a1n, a2n, a3n = Fct(NHPR)$:

Si $NHPR < 0.75$: $n=1.$

Si $0.75 < NHPR < 0.9$: $n=2.$

Si $NHPR > 0.9$: $n=3.$

$QMF(PLAR, Npt)$. (Fonction discontinue) :

$NptR = Npt / Nptnom$

Si $PLAR < 0.215$:

$QMF = b0 * PLAR * NptR + b1 * PLAR + b2 * NptR + b3$

Sinon :

$QMF = NptR * (c00 * PLAR^4 + c01 * PLAR^3 + c02 * PLAR^2 + c03 * PLAR + c04)$
 $+ (c10 * PLAR^4 + c11 * PLAR^3 + c12 * PLAR^2 + c13 * PLAR + c14)$

$Ctu(QMF, Npt)$. (Abaque)

$PHP(QMF, Npt)$. (Abaque)

$THP(QMF, Npt)$. (Abaque)

Fournies en annexe avec détail de calcul des interpolations (voir chapitre 5.1).

4.3.2.2 Turbine de puissance

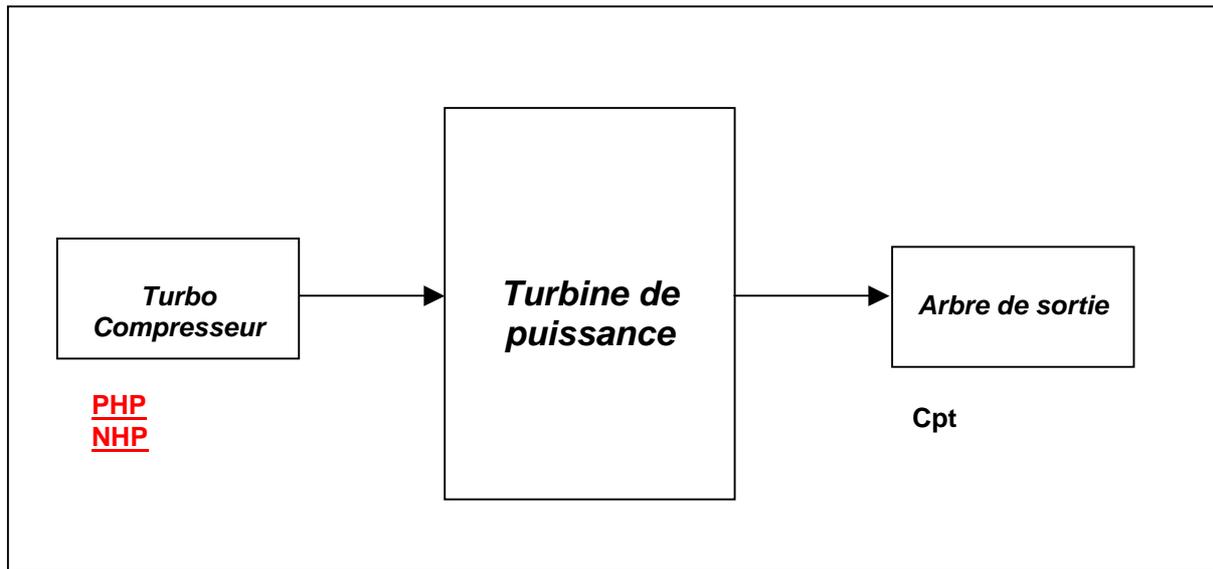


Fig. 4.3.5

Rôle :

La turbine de puissance est entraînée par les gaz haute pression du turbocompresseur. Ceux-ci sont convertis en couple moteur.

Schéma général :

- La relation liant le couple moteur aux deux grandeurs thermodynamiques d'entrée est modélisée sous forme d'abaque.

Type de modélisation utilisée :

Modèle de connaissance
Les données internes à SITIA (Abaques).

Modèle de comportement
/

Entrées – Sorties – Paramètres de la turbine de puissance :

Variables d'entrée :	Valeurs initiales de simulation		
PHP	P0	(Bars)	Pression en sortie du turbo compresseur.
NHP	0	(tr/min)	Vitesse de rotation du turbo compresseur.
Variables de sortie :			
CPT	0	(N.m)	Couple moteur sur l'arbre de sortie.

Equation :

Abaque : $Cpt = Cpt(PHP, NHP)$.

4.3.2.3 Arbre

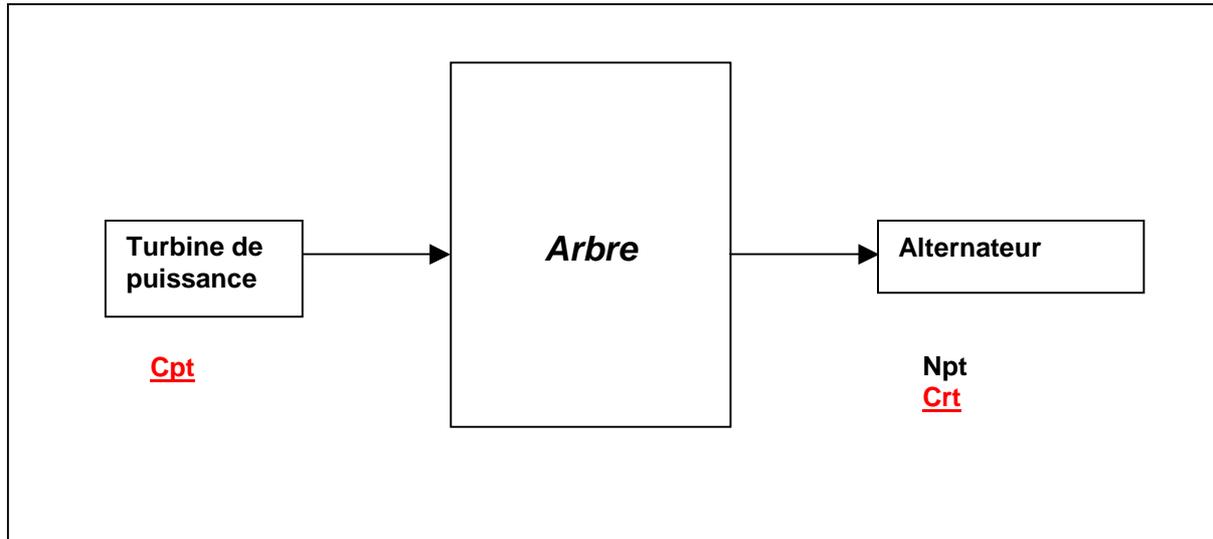


Fig. 4.3.6

Rôle :

L'arbre de sortie de l'organe de liaison entre la TAG et sa charge mécanique. Ce modèle collecte l'ensemble des couples moteurs et résistants du système afin d'en définir sa vitesse de rotation.

Schéma général :

- L'arbre est considéré comme solidaire de la turbine de puissance, il entraîne l'alternateur. Il n'y a pas de système d'embrayage.
- Comme la charge est un alternateur électrique, on peut la modéliser par un couple résistant statique sur l'arbre. Ce couple sera activé lors du fonctionnement en charge de l'alternateur, c'est à dire la vitesse de rotation sera stabilisée autour de sa valeur nominale.

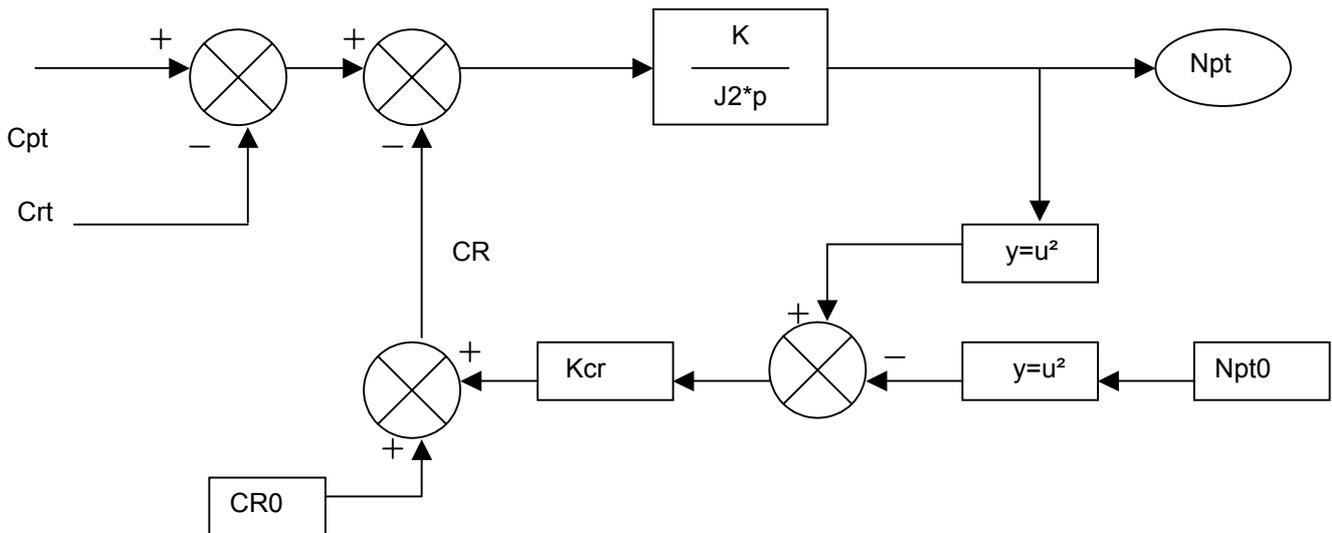


Fig. 4.3.7

Type de modélisation utilisé :

Modèle de connaissance

/

Modèle de comportement

Les données internes à SITIA (paramètres mécaniques de l'arbre).

Entrées – Sorties – Paramètres :

	Valeurs initiales de simulation		
Variables d'entrée :			
Cpt	0	(N.m)	Couple moteur sur l'arbre de sortie.
Crt	0	(N.m)	Couple de charge sur l'arbre de sortie (charge).
Variables de sortie :			
Npt	0	(tr/min)	Vitesse de rotation de l'arbre de sortie.
W	0	(Mwatts)	Puissance de sortie de la TAG.
Variables locales :			
CR	0	(N.m)	Couple de frottement de l'arbre.
	Valeurs de simulation		
Paramètres globaux :			
J2	82	(Kg.m ²)	Inertie de l'arbre de sortie de la TAG (à vide).
CR0	1740	(N.m)	Couple résistant à la vitesse désirée.
Npt0	900	(tr/min)	Vitesse désirée de fonctionnement.
Kcr	2.14815 E-3	(N.m/(tr/min))	Gain frottements.
K	60 / 2π	(tr/min)/(rad/sec.)	Coefficient de conversion de vitesse.

Equations :

Calcul de CR :

$$CR = CR0 + Kcr \cdot (Npt^2 - Npt0^2).$$

Calcul de Npt :

$$Npt = (Cpt - CR - Crt) \cdot K / (J2 \cdot p).$$

Calcul de W :

$$W = (Cpt \cdot Npt) / (K \cdot 1E6).$$

4.3.3 Contrôle commande de la TAG

4.3.3.1 Contrôle de puissance

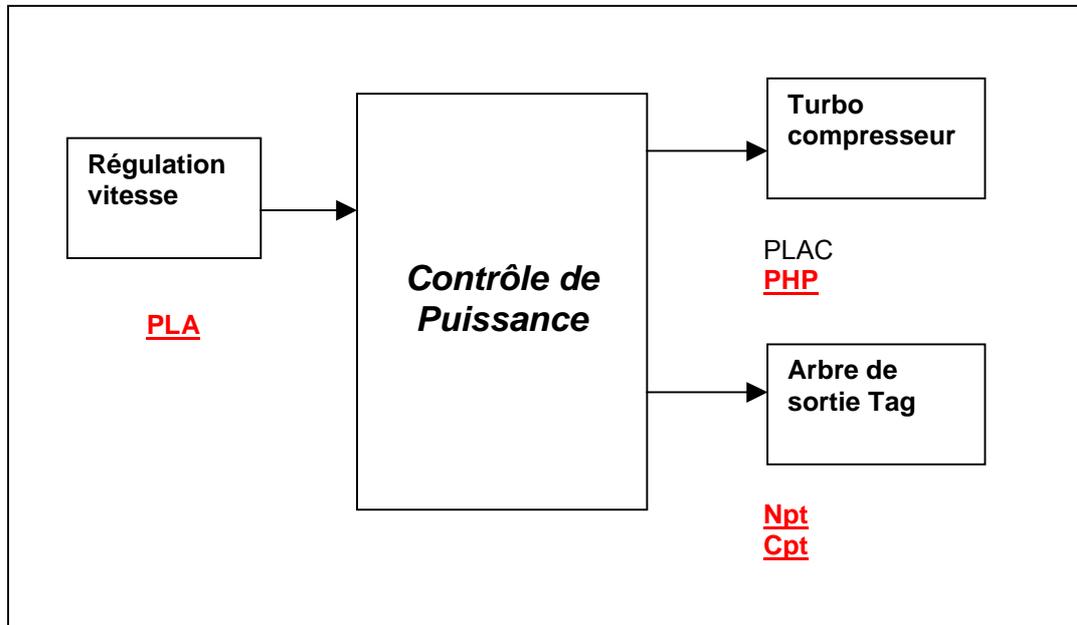


Fig. 4.3.8

Rôle :

Le contrôle de puissance permet de corriger l'angle de commande du levier afin de limiter le régime de fonctionnement de la TAG. Ces limitations empêchent l'emballement de la turbine à vide, empêchent la surcharge mécanique et assurent des variations pas trop importantes de la vitesse de rotation de l'arbre de sortie.

Schéma général :

- Le calcul de la correction de l'angle se fait à partir de la connaissance des variables Npt et Cpt. Le couple Cpt n'est pas facilement mesurable, on doit théoriquement l'estimer (CptE) à partir de la connaissance de la pression PHP, de Npt et de paramètres. Pour simplifier, la présente modélisation prend directement en compte la mesure réelle du couple Cpt.
- La sortie PLAC est à l'image de PLA si le système n'atteint pas les limites définies en paramètres.

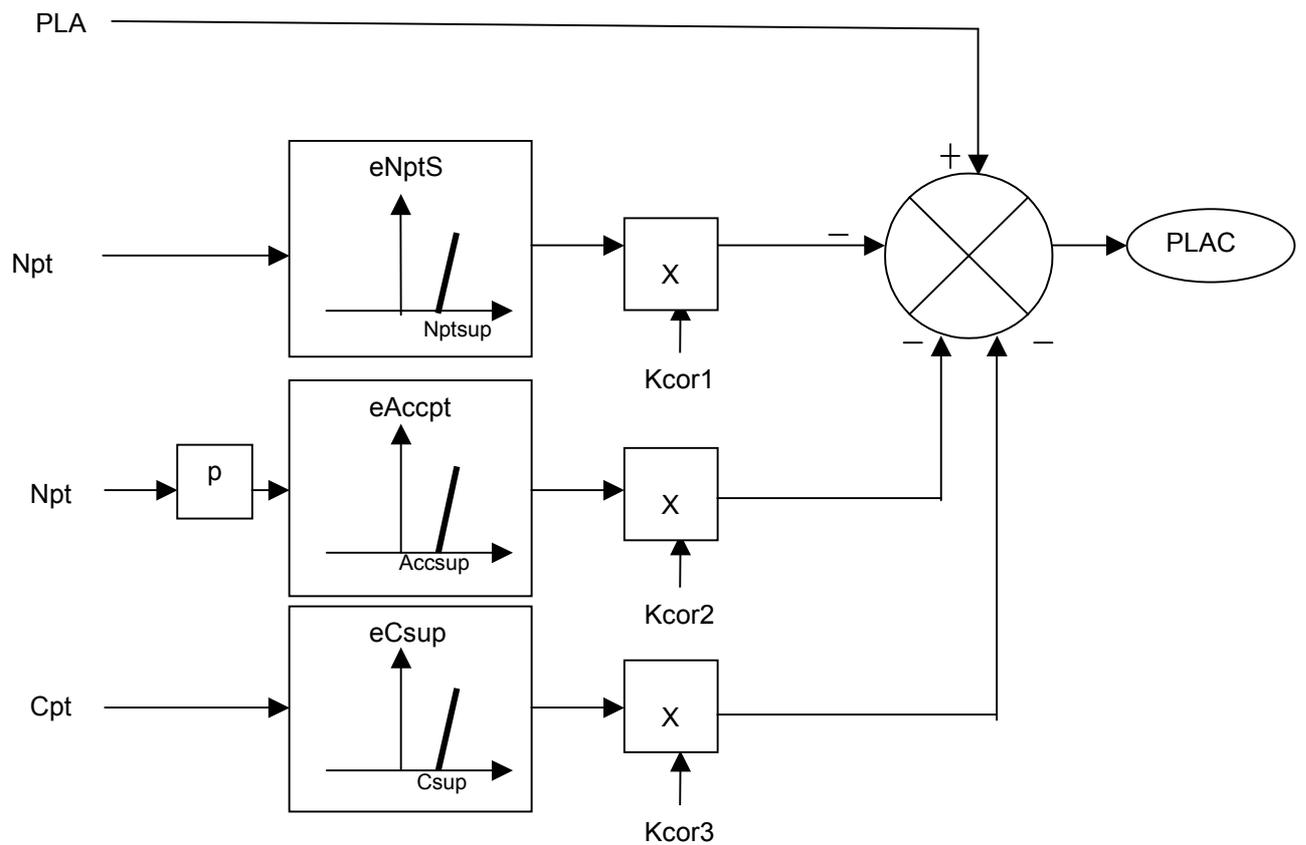


Fig. 4.3.9

Type de modélisation utilisée :

Modèle de connaissance
/

Modèle de comportement

Les données internes à SITIA avec les limites de fonctionnement et paramètres de correction.

Remarque : Les valeurs des coefficients Nptsup, Kcor1 et Kcor2 du bloc de contrôle de puissance ont été modifiés par rapport au modèle de turbine à Gaz interne SITIA. Ces changements permettent d'obtenir un résultat plus cohérent pour le signal qui commande le débit de combustible (QMF)

4.3.3.2 L'asservissement de vitesse de la Tag

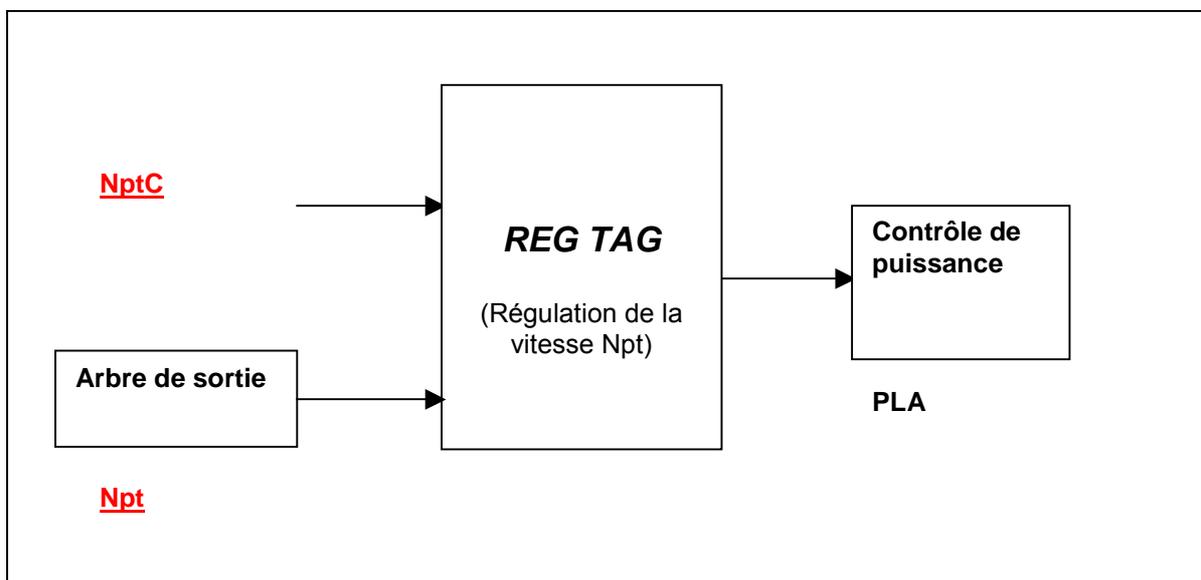


Fig. 4.3.10

Rôle :

Le contrôle commande de la TAG permet de réguler sa vitesse ; ceci est important car la vitesse de l'arbre de l'alternateur détermine la fréquence des courants électriques (60 Hertz à 3600 tr/min).

Type de modélisation utilisée :

Modèle de connaissance

/

Modèle de comportement

Le contrôle commande est développé par SITIA. C'est un régulateur PI permettant d'asservir la vitesse Npt de la TAG.

Entrées – Sorties – Paramètres :

Variables d'entrée :	Valeurs initiales de simulation		
Npt	0	(Tr/min)	Vitesse de rotation de l'arbre de sortie.
NptC	0	(Tr/min)	Consigne de vitesse de l'arbre de sortie
Variable de sortie :			
PLA	0	(degrés)	Angle de levier de commande de puissance
Paramètres globaux : Valeurs de simulation			
Kp	0.01		coefficient proportionnel
Ti	0.01	(secondes)	composante intégrale du régulateur

Equation :

$$PLA = [Kp + 1/(Ti \cdot p)] \cdot [NptC - Npt]$$

5. Annexes

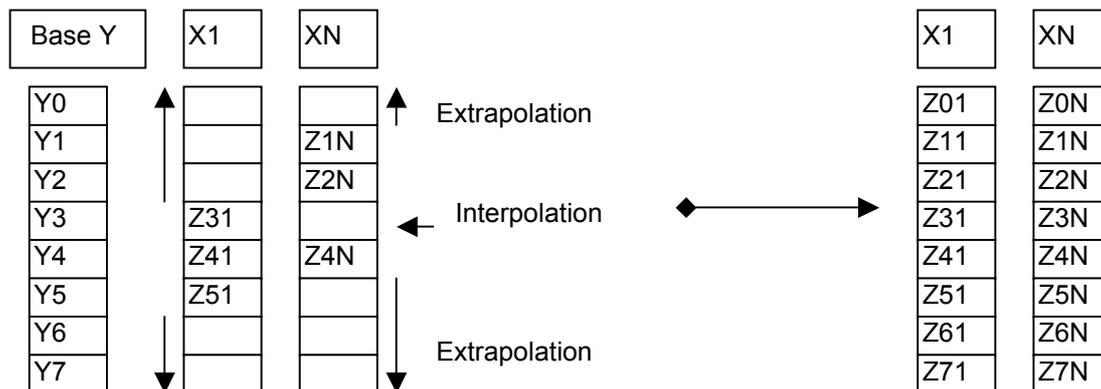
5.1 Interpolation et extrapolation des abaques

La principale difficulté consiste à implanter les valeurs numériques des grandeurs suivantes sous forme d'abaques en deux dimensions (à deux variables d'entrée X et Y) :

- CTU : Le couple moteur de l'arbre du compresseur.
- PHP : La pression de sortie du compresseur.
- THP : La température des gaz en sortie du compresseur.
- CPT : Le couple moteur de l'arbre de sortie.

Si l'on paramètre une des deux variables d'entrée (par exemple X) en N éléments, il faut obtenir chaque tableau de mesures pour des mêmes valeurs de la seconde variable (Y) d'une courbe paramétrée à une autre. On peut alors définir une matrice sous MATLAB qui contient les valeurs de la grandeur correspondante.

Hors les relevés thermodynamiques ne sont possibles que pour des points de fonctionnement précis où l'on ne peut fixer qu'une variable en paramètre. Il est nécessaire de procéder à une interpolation de la grandeur recherchée pour tous les points possibles pris par la seconde variable. On crée donc à l'initialisation de la simulation un vecteur monotone (Vecteur de Base) représentatif de toutes les valeurs possibles prises par la variable Y. On interpole et extrapole les données Z en fonction de Y sur tout ce vecteur et ceci pour les N valeurs du paramètre X.



L'ensemble des N sous vecteurs (colonnes) obtenus forment la matrice exploitable sous forme de table SIMULINK.

Interpolation sous MATLAB :

La méthode d'interpolation linéaire proposée sous MATLAB permet de trouver une valeur approximative lorsque le système est dans un état non répertorié dans la matrice. Cette méthode est moins précise que des interpolations de type non linéaire existantes mais elle a l'avantage d'empêcher la production d'une solution irréaliste lorsque les valeurs d'entrée de la table s'écartent un peu trop des valeurs limites saisies.

Interpolation sous SIMULINK :

L'abaque deux dimensions de SIMULINK ne permet que l'interpolation linéaire sur X et sur Y pour trouver le nombre Z correspondant. De plus, l'abaque extrapole automatiquement les données si l'on sort des limites d'entrée de table. Il faut donc veiller à ne pas dépasser ces limites inférieures et supérieures. La limite inférieure peut être réalisée en rajoutant un paramètre initial dans les vecteurs X et Y d'entrée et en s'assurant que l'on ne passera jamais en dessous (utilisation d'élément de saturation et avertisseurs booléens). La limite supérieure est moins contraignante, on rajoute éventuellement un nombre à la fin des vecteurs X et Y de telle sorte que la valeur de sortie de la table n'évolue presque plus en cas de dépassement d'une entrée. Ceci peut physiquement correspondre à une saturation douce d'une grandeur (pression limite ou couple moteur maximal). De plus cela assure une stabilité.

5.2 Tables CTU=f(QMF,NPT) ; PHP=f(QMF,NPT) ; THP=f(QMF,NPT)

(avec NPT en paramètre).

Les cases grisées correspondent à des valeurs rajoutées aux abaques afin de définir des limites. Ceci est utilisé pour permettre au logiciel utilisant ces tables de réaliser des extrapolations linéaires en dehors des valeurs définies par les abaques. On fixe les seuils minimaux sur les plus petites valeurs possibles prises par la variable. Les seuils maximaux sont pris légèrement supérieurs aux valeurs précédentes des séries de donnée, afin d'empêcher le logiciel de calculer une valeur aberrante.

QMF0600	0	396.7	6000																	
QMF0900	0	402.1	749.4	1278.7	1879.0	6000														
QMF1200	0	404.6	709.9	1193.6	1619.2	2884.9	3882.8	6000												
QMF1500	0	402.1	6000																	
QMF1800	0	389.0	716.0	1150.7	1481.8	2406.8	3333.1	3819.6	4337.2	4463.3	6000									
QMF2400	0	783.1	1170.2	1479.6	2267.8	3064.3	3453.6	3841.5	4246.8	4704.7	5178.3	6000								
QMF3000	0	896.6	1235.4	1528.1	2265.4	2985.1	3335.9	3691.3	4039.9	4400.2	4799.5	5232.	5712.6	5725.3	6000					
QMF3300	0	964.4	1284.1	1565.8	2286.1	2986.0	3325.3	3669.3	4007.6	4349.5	4721.5	5115.7	5573.4	5777.5	6000					
QMF3600	0	1024.7	1344.6	1622.1	2317.4	2999.1	3333.6	3666.1	4001.6	4330.7	4682.5	5067.2	5483.6	5809.7	6000					

CTU0600	0	3721	40000																	
CTU0900	0	3740	6968	13831	19975	40000														
CTU1200	0	3750	6452	12014	17141	28323	35779	40000												
CTU1500	0	3740	40000																	
CTU1800	0	3692	6401	10669	14701	23777	31475	35173	38858	39704	40000									
CTU2400	0	7046	10618	14099	21935	28801	31941	35002	37991	41128	43828	44000								
CTU3000	0	8267	11302	14313	21331	27716	30519	33354	36051	38727	41548	44025	45789	45641	46000					
CTU3300	0	8988	11860	14642	21311	27421	30203	32920	35561	38100	40813	43337	45777	45863	46000					
CTU3600	0	9857	12591	15191	21454	27329	30057	32713	35307	37759	40341	42945	45280	46458	47000					

PHP0600	1.013	1.1050	2																	
PHP0900	1.013	1.1128	1.2991	1.7276	2.1333	2.2														
PHP1200	1.013	1.1164	1.2868	1.6511	1.9864	2.7563	3.3271	4												
PHP1500	1.013	1.1129	4																	
PHP1800	1.013	1.0937	1.3016	1.6071	1.8878	2.5033	3.0563	3.3300	3.5907	3.6466	4									
PHP2400	1.013	1.3437	1.6257	1.8823	2.4382	2.9255	3.1537	3.3772	3.5963	3.7983	3.9832	4								
PHP3000	1.013	1.4114	1.6776	1.9189	2.4439	2.9014	3.1112	3.3147	3.5166	3.7113	3.8920	4.0614	4.2181	4.2240	4.3					
PHP3300	1.013	1.4571	1.7194	1.9483	2.4597	2.9062	3.1161	3.3160	3.5103	3.7009	3.8790	4.0489	4.2055	4.2739	4.3					
PHP3600	1.013	1.5120	1.7714	1.9925	2.4820	2.9172	3.1242	3.3246	3.5171	3.7033	3.8826	4.0550	4.2145	4.3171	4.4					

THP0600	15	669.0	700																	
THP0900	15	675.0	702.0	703.8	765.2	800														
THP1200	15	677.8	705.7	724.4	744.7	870.5	955.9	1000												
THP1500	15	675.1	700																	
THP1800	15	660.4	714.4	758.0	761.3	841.6	917.0	954.6	998.5	1010.6	1050									
THP2400	15	722.1	771.7	781.6	843.6	909.9	938.3	964.8	994.2	1036.8	1084.2	1100								
THP3000	15	728.7	776.0	795.8	859.3	916.4	941.8	967.7	990.1	1015.0	1049.8	1092.2	1144.5	1145.5	1150					
THP3300	15	732.6	776.8	800.5	867.3	924.7	948.1	972.8	995.0	1017.2	1047.3	1082.2	1131.3	1152.2	1200					
THP3600	15	735.0	776.1	805.1	874.2	931.4	955.3	977.7	1000.7	1021.8	1048.3	1081.7	1122.5	1158.2	1200					

5.3 Table CPT=f(PHP,NHP)

(avec NHP en paramètre).

Pour la table définissant PHP, les bornes rajoutées en gris correspondent aux valeurs maximales et minimales qu'il soit possible de rencontrer dans la table. Ceci permet l'interpolation des séries de relevés sur l'ensemble de définition de la variable de pression.

PHP4950	1.013	1.0937	1.1050	1.1128	1.1129	1.1164	4.3		
PHP6900	1.013	1.3031	1.3761	4.3					
PHP7000	1.013	1.3181	1.4233	4.3					
PHP7100	1.013	1.3441	1.4338	1.4735	4.3				
PHP7200	1.013	1.3810	1.4782	1.5046	1.5286	4.3			
PHP7300	1.013	1.4289	1.5120	1.5638	1.5811	1.5901	4.3		
PHP7400	1.013	1.4877	1.6173	1.6213	1.6544	1.6596	1.6645	4.3	
PHP7500	1.013	1.5576	1.6848	1.7286	1.7388	1.7521	1.7562	4.3	
PHP7600	1.013	1.6383	1.6983	1.7686	1.8293	1.8469	1.8574	1.8587	4.3
PHP7700	1.013	1.7301	1.7826	1.8694	1.9327	1.9693	1.9740	1.9762	4.3
PHP7800	1.013	1.8328	1.8812	1.9838	2.0488	2.0928	2.1060	2.1117	4.3
PHP7900	1.013	1.9465	1.9921	2.1084	2.1753	2.2282	2.2482	2.2604	4.3
PHP8000	1.013	2.0711	2.1135	2.2400	2.3101	2.3758	2.4026	2.4201	4.3
PHP8100	1.013	2.2433	2.3750	2.4508	2.5354	2.5685	2.5901	4.3	
PHP8200	1.013	2.3798	2.5102	2.5948	2.6981	2.7356	2.7610	4.3	
PHP8300	1.013	2.5209	2.6431	2.7383	2.8474	2.8874	2.9169	4.3	
PHP8400	1.013	2.6647	2.7743	2.8771	2.9691	3.0130	3.0493	4.3	
PHP8500	1.013	2.8094	2.9053	3.0080	3.0828	3.1372	3.1787	4.3	
PHP8600	1.013	2.9529	3.0372	3.1362	3.2267	3.2812	3.3201	4.3	
PHP8700	1.013	3.0934	3.1709	3.2697	3.3741	3.4245	3.4669	4.3	
PHP8800	1.013	3.2290	3.3043	3.3975	3.4985	3.5487	3.5935	4.3	
PHP8900	1.013	3.4338	3.5096	3.6115	3.6561	3.7090	4.3		
PHP9000	1.013	3.5534	3.6173	3.7205	3.7724	3.8365	4.3		
PHP9100	1.013	3.7274	3.8261	3.8862	3.9492	4.3			
PHP9200	1.013	3.8306	3.9161	3.9682	4.0354	4.3			
PHP9300	1.013	3.9152	3.9839	4.0279	4.1025	4.3			
PHP9400	1.013	3.9694	4.0360	4.0817	4.1555	4.3			
PHP9500	1.013	4.0801	4.1352	4.1975	4.3				
PHP9600	1.013	4.1200	4.1850	4.2316	4.3				
PHP9700	1.013	4.1551	4.2278	4.2610	4.3				
PHP9800	1.013	4.1841	4.2602	4.2889	4.3				
PHP9900	1.013	4.2062	4.2790	4.3					
PHP10000	1.013	4.2203	4.2806	4.3					
PHP10050	1.013	4.2240	4.2739	4.3					

La série suivante donne les valeurs du couple moteur Cpt en fonction de PHP pour un échantillon de régime de NHP. La fonction Cpt = f(PHP) est décroissante, les bornes des séries (en gris) sont choisies afin de créer un phénomène de saturation du couple de Cpt lorsque l'entrée PHP de l'abaque s'éloigne de valeurs standards qu'elle prend d'habitude pour un régime moteur.

CPT4950	8	8	2273	1740	658	1204	1200		
CPT6900	8050	8055	3622	3620					
CPT7000	8600	8594	4587	4580					
CPT7100	9550	9530	2755	5632	5630				
CPT7200	1100	10867	2473	3981	6796	6790			
CPT7300	12700	12611	1980	3813	5343	8122	8120		
CPT7400	15000	14769	3473	12254	5331	9655	6877	6870	
CPT7500	17500	17351	13986	5222	11449	7066	8619	8610	
CPT7600	20500	20369	19414	16333	13566	7238	10616	9056	9050
CPT7700	24000	23835	22340	19243	16075	12920	9546	11339	11330
CPT7800	28000	27766	25845	22657	19010	15578	13947	12168	12160
CPT7900	33000	32176	29884	26509	22343	18624	16915	15128	15120
CPT8000	37100	37085	34403	30717	26036	22092	20290	18453	18450
CPT8100	40000	39334	35186	30038	26000	24105	22159	22150	
CPT8200	45000	44597	39803	34276	30155	28127	26032	26030	
CPT8300	50200	50102	44467	38634	34133	31898	29668	29660	
CPT8400	56000	55749	49162	42974	37496	35086	32814	32810	
CPT8500	62000	61433	53890	47168	40725	38324	35946	35940	
CPT8600	67500	67050	58659	51356	44903	42208	39450	39450	
CPT8700	73000	72495	63471	55776	49219	46168	43207	43200	
CPT8800	78000	77673	68300	60024	52878	49628	46520	46520	
CPT8900	73500	73092	63780	56257	52659	49609	49600		
CPT9000	78000	77670	67509	59643	56085	53113	53110		
CPT9100	72000	71517	63088	59573	56283	56280			
CPT9200	76000	75420	66085	62135	58773	58770			
CPT9300	79000	78694	68388	64052	60773	60770			
CPT9400	81000	80819	70257	65846	62404	62400			
CPT9500	72000	71950	67678	63740	63740				
CPT9600	74000	73547	69417	64860	64860				
CPT9700	75000	74926	70922	65853	65850				
CPT9800	76500	76009	72062	66822	66820				
CPT9900	77000	76772	72718	72710					
CPT10000	77500	77223	72774	72770					
CPT10050	78000	77337	72542	72540					