

Fiche-guide de TD sur la modélisation d'une centrale solaire thermodynamique

1) Objectifs du TD

L'objectif du projet est d'étudier le fonctionnement des centrales électriques solaires et de montrer comment on peut les modéliser de manière réaliste avec Thermoptim.

Le TD est centré sur la modélisation d'une centrale solaire du type SEGS mise au point par la société Luz, représentée comme une simple variante d'un cycle de Rankine, où la chaudière est remplacée par un générateur de vapeur dont le caloporteur est réchauffé par le champ de capteurs.

On demande aux élèves d'effectuer un premier paramétrage du modèle sur la base des valeurs fournies dans l'énoncé, puis de réaliser des études de sensibilité en jouant sur le débit du caloporteur et la température de sortie des capteurs solaires, en considérant un écart de température constant entre cette dernière et la température de la vapeur surchauffée.

Ce TD relativement simple s'adresse à des élèves ayant déjà étudié les centrales à vapeur. Si ce n'est pas le cas, il faut prévoir qu'ils le fassent comme activité préalable.

Le présent document est un extrait de la fiche-guide complète avec résultats, qui est réservée aux enseignants. C'est pour cette raison que la numérotation des figures comporte des lacunes.

2) Références

De nombreuses références sur la conversion solaire thermodynamique peuvent être obtenues à partir du moteur de recherche du site <http://www.nrel.gov/> (entrer par exemple "solar trough" pour les capteurs paraboliques, ou "solar collector" pour les capteurs solaires).

Vous pouvez aussi vous référer aux articles suivants des Techniques de l'Ingénieur :
"Chauffage de fluides par capteurs solaires à concentration", B2420, par R. PASQUETTI
"Production d'énergie électrique par sources renouvelables", D4005, par B. MULTON

3) TD principale

3.1 Énoncé

Ce TD est basé sur la technologie des capteurs cylindro-paraboliques mis en œuvre dans l'installation du désert de Mojave (Californie - 1984), où neuf centrales de taille unitaire comprise entre 14 et 80 MW totalisent 354 MW.

Au début des années 1980, les pays industrialisés craignirent de manquer de pétrole à bon marché et favorisèrent ces installations solaires. Le projet du désert de Mojave fait ainsi partie des nombreux projets de centrales électro-solaires qui virent le jour à cette période en Espagne (Almeria, 1981), en France (Targassone), au Japon et en ex-URSS. Alors que ces centrales avaient bénéficié de conditions de vente de l'électricité particulièrement intéressantes, les conditions économiques de la fin des années 1980 mirent fin à leur développement.

Dans les centrales à capteurs cylindro-paraboliques SEGS (figure 3.1), la vapeur reçoit sa chaleur d'une huile thermique chauffée (à une température maximale de 393 °C) par un champ de capteurs solaires cylindro-paraboliques. La température de surchauffe est dans ces conditions limitée à 371 °C, et la pression de la vapeur à 100 bars. Par ailleurs, ces centrales étant utilisées dans des zones chaudes et ensoleillées, la température de condensation est relativement élevée (45 °C, soit une pression voisine de 0,096 bar).

L'objectif du travail est d'étudier un tel cycle et de le modéliser avec Thermoptim, en utilisant le composant externe "solar concentrator" avec le corps externe "Dowtherm A" comme fluide de transfert, et d'en calculer le rendement pour un flux solaire incident de 1000 W/m^2 , pour une centrale SEGS utilisant les capteurs Luz dont les caractéristiques sont données ci-dessous.

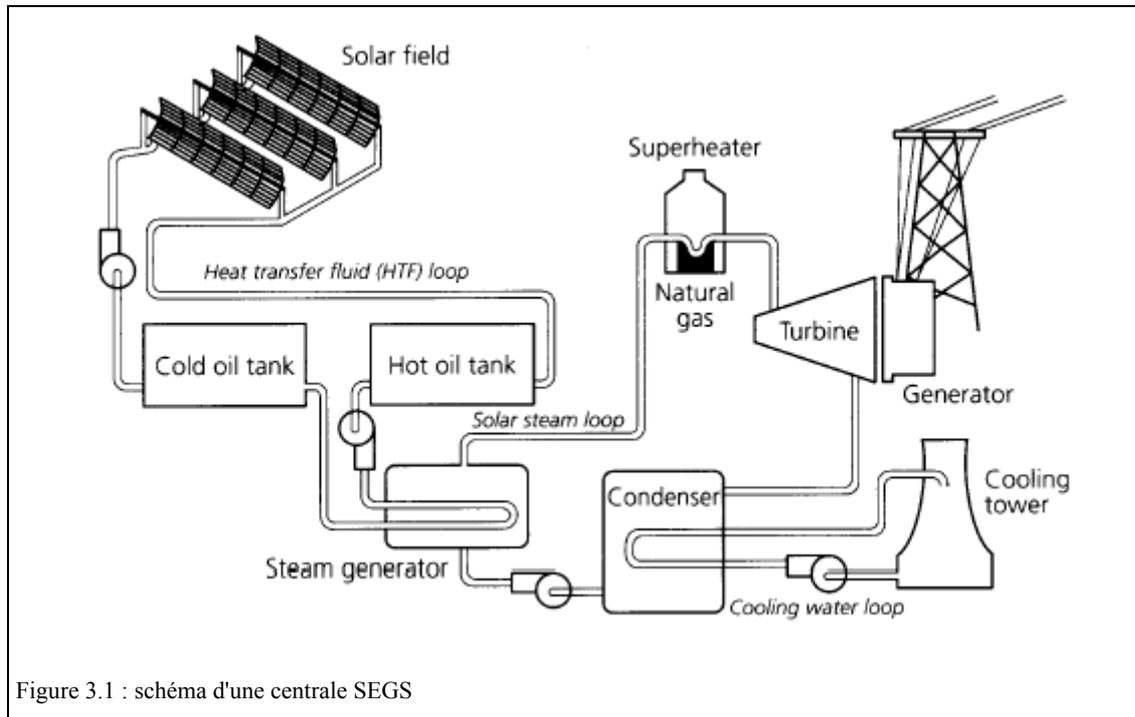


Figure 3.1 : schéma d'une centrale SEGS

Le paramétrage initial sera effectué sur la base suivante :

Pression du cycle vapeur : 43,4 bars
 Température de surchauffe : 365 °C
 Température de condensation : 45 °C
 Débit du cycle vapeur : 35,75 g/s
 Température de sortie des capteurs solaires : 390 °C
 Débit du caloporteur : 550 g/s
 Température extérieure : 35 °C
 Rendement isentropique turbine : 0,86

3.2 Modèle de capteurs solaires à concentration

Pour atteindre des températures élevées (supérieures à 120°C), il est nécessaire de concentrer les rayons solaires par des jeux appropriés d'éléments réfléchissants (miroirs) ou de lentilles. La contrainte principale, outre le coût des dispositifs plus élevé que celui des capteurs plans, est le système de poursuite destiné à suivre le soleil dans sa course. Toute une série de concentrateurs a été proposée et développée, le choix des capteurs cylindro-paraboliques correspondant au meilleur compromis technico-économique pour les centrales du désert de Mojave.

Le flux solaire reçu par le capteur est d'abord réfléchi sur les miroirs du concentrateur, puis il traverse généralement un vitrage destiné à isoler thermiquement le foyer où il est absorbé par une surface appropriée. La réflexion, la transmission à travers le vitrage, et l'absorption se traduisent par des pertes optiques, caractérisées globalement par une efficacité τ . Dans les capteurs à concentration élevée, seule la composante directe du rayonnement solaire peut être dirigée vers le foyer, la composante diffuse ne pouvant être concentrée.

L'absorbeur s'échauffe et perd de la chaleur vers l'extérieur sous forme essentiellement de rayonnement et de convection. Cette perte peut être caractérisée par un coefficient de pertes thermiques U . Un fluide caloporteur refroidit l'absorbeur en emportant la chaleur utile qui est ensuite convertie ou transférée pour différents usages.

Les paramètres du modèle de capteur solaire à concentration sont ainsi les suivants :

- l'efficacité optique du capteur τ

- le coefficient de pertes thermiques U ($\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$)
- la puissance solaire directe incidente I (W/m^2)
- la surface du capteur S_c (m^2)
- éventuellement (si U est ramené à cette valeur) la surface de l'absorbeur S_a (m^2)
- la température extérieure T_{ext} ($^{\circ}\text{C}$)

Les données d'entrée du modèle sont les suivantes (fournies par les autres composants du système) :

- la température du fluide caloporteur à l'entrée du capteur T_{amont} ($^{\circ}\text{C}$)
- le débit \dot{m} du fluide caloporteur (kg/s)

Les sorties sont :

- la température du fluide caloporteur à la sortie du capteur T_{aval} ($^{\circ}\text{C}$)
- la puissance thermique reçue par le fluide caloporteur Q_{ex} (W/m^2)
- le rendement du capteur

Deux modes de calcul sont possibles (cf. figure 3.3) : déterminer l'état du point de sortie connaissant les surfaces du capteur et de l'absorbeur, ou bien déterminer ces deux surfaces (avec l'hypothèse que leur rapport est fixé) connaissant l'état du point de sortie.

Avec les notations ci-dessus, U étant exprimé par rapport à la surface S_c du capteur et non à celle de l'absorbeur S_a , et en supposant d'une part que l'absorbeur est à la même température que le caloporteur, et d'autre part une répartition linéaire des températures dans le capteur, hypothèse valable si le débit n'est pas trop faible, ce qui est souvent le cas en pratique, l'équation du modèle est la suivante, T_m étant la température moyenne de l'absorbeur :

$$Q_{\text{ex}} = \dot{m} C_p (T_{\text{aval}} - T_{\text{amont}}) = [\tau I - U (T_m - T_{\text{ext}})] S_c$$

Les pertes thermiques d'un capteur à concentration suivant généralement une loi parabolique, le coefficient de pertes U peut souvent être bien représenté par une fonction affine de l'écart de température entre l'absorbeur et l'air ambiant :

$$U = U_0 + U_1 (T_m - T_{\text{ext}})$$

A titre d'exemple, le tableau ci-dessous donne des valeurs de coefficients valables pour quatre catégories de capteurs : des cylindro-paraboliques Luz, un concentrateur parabolique et un capteur à lentille de Fresnel linéaire.

	Luz 2	Luz 3	parabolique	Fresnel
τ	0,737	0,8	0,7	0,66
S_c/S_a	22,6	26,1	500	20
U_0	-0,0223	-0,0725	0,21	-0,031
U_1	0,000803	0,00089	0,000134	0,00061

En divisant la chaleur collectée par le produit de la surface du capteur par l'ensoleillement reçu I , on peut exprimer le rendement sous la forme :

$$\eta = \tau - U \frac{(T_m - T_{\text{ext}})}{I}$$

3.3 Démarche de résolution

Pour que les élèves se familiarisent avec la problématique de la captation thermodynamique de l'énergie solaire, il est recommandé qu'ils commencent par travailler sur les 20 premières étapes de la séance Diapason ENR01¹. Ils pourront ensuite faire sur Internet une recherche personnelle sur les centrales SEGS et approfondir la modélisation des capteurs à concentration en essayant de bien comprendre la section 3.2.

¹ Séance ENR01: <http://www.thermooptim.org/SE/seances/ENR01/seance.html>

Ils pourront alors commencer à construire le modèle demandé. La modélisation dans ThermoOptim du cycle de la centrale SEGS conduit à un schéma du type de celui de la figure 3.2, où le composant "champ de capteurs" est une transfo externe du type "solar concentrator" parcourue par du Dowtherm A.

Pour des élèves ayant déjà modélisé un cycle à vapeur simple (si ce n'est pas le cas, il faut qu'ils commencent par travailler sur les séances S25 et S26²), les seules difficultés concernent les points suivants :

- sélection du composant "solar concentrator" et du fluide "DowTherm A"
- construction et paramétrage de l'échangeur de chaleur en trois parties

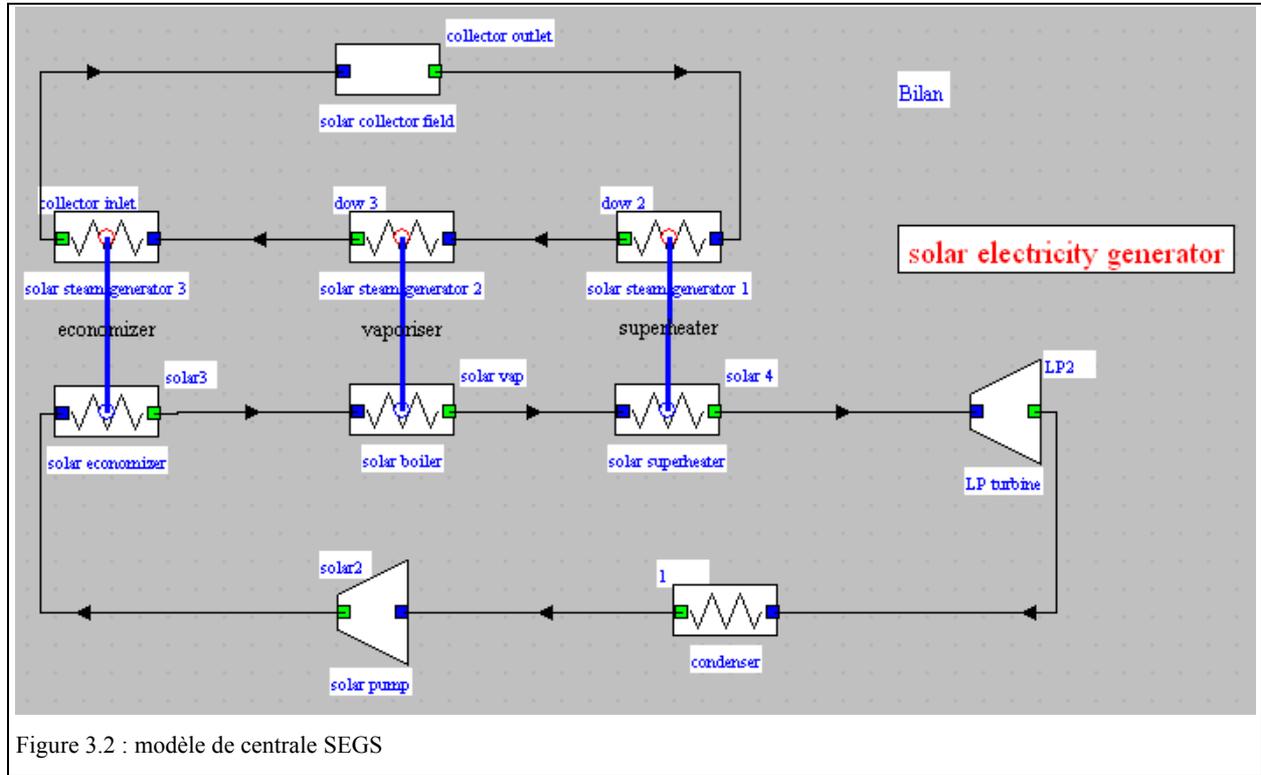


Figure 3.2 : modèle de centrale SEGS

La première difficulté est très facilement levée en se référant à la note Utilisation des classes externes ou en opérant comme indiqué dans les 9 premières étapes de la séance Diapason S07_ext³.

La manière de résoudre la seconde est expliquée en détail en fin de séance S18⁴ sur la thermodynamique des échangeurs, dans un exercice où sont paramétrés les échangeurs représentant une chaudière pour le cycle à vapeur simple de la séance S26.

Pour faciliter les calculs dans l'écran du champ de capteurs à concentration, il est préférable de choisir l'option "Calculate collector area", car elle permet de maintenir constante la température de sortie du champ de capteurs : pour le paramétrage choisi, la surface de capteurs nécessaire sera recalculée quelle que soit la valeur de la température d'entrée.

Le choix des énergies payante et utile se fait comme habituellement dans ThermoOptim, le champ de capteurs étant du premier type, et la pompe et la turbine du second.

3.4 Représentation dans les diagrammes thermodynamiques

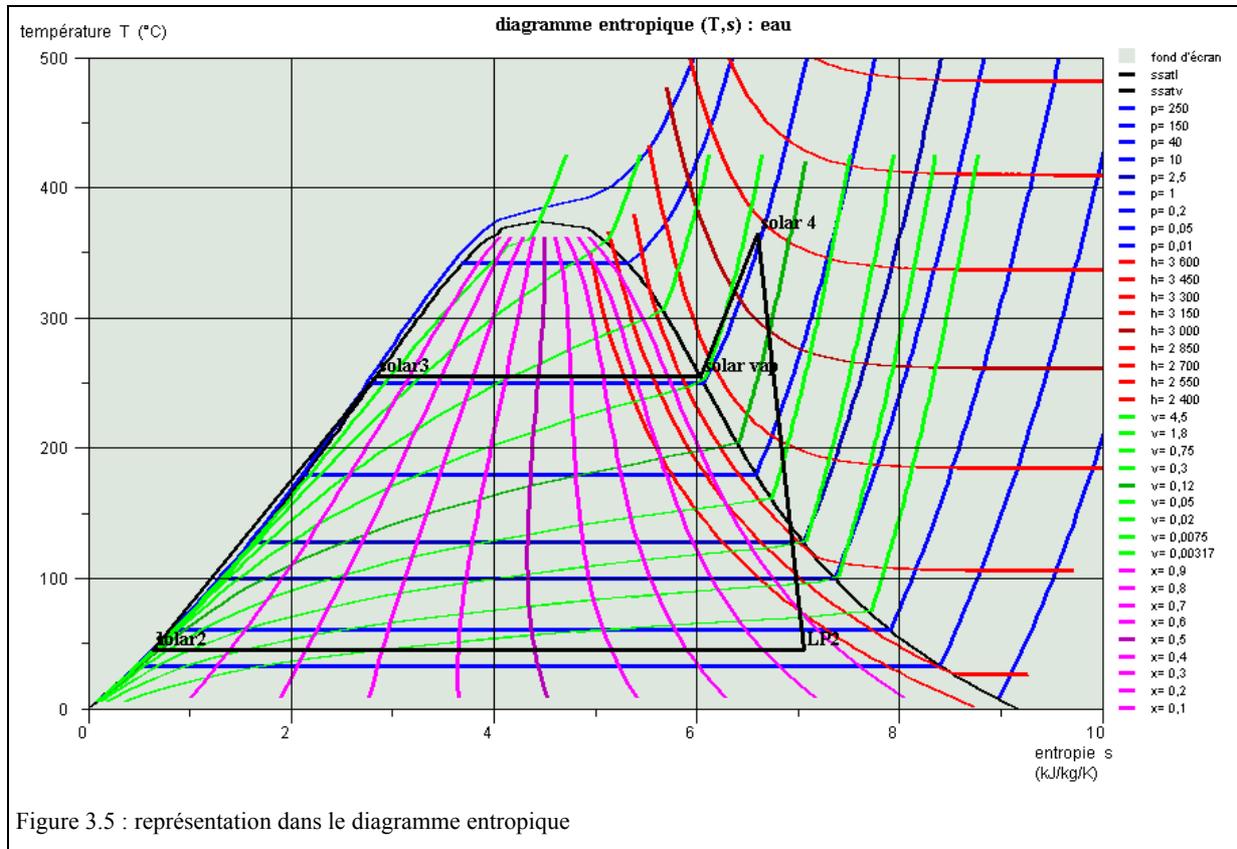
² Séance S25 : <http://www.thermooptim.org/SE/seances/S25/seance.html>

Séance S26 : <http://www.thermooptim.org/SE/seances/S26/seance.html>

³ Séance S07_ext : http://www.thermooptim.org/SE/seances/S07_ext/seance.html

⁴ Séance S18 : <http://www.thermooptim.org/SE/seances/S18/seance.html>

Une fois les points du cycle déterminés, il est facile de les représenter dans un diagramme thermodynamique tel que le diagramme entropique en utilisant les fonctionnalités que propose Thermoptim. La figure 3.5 montre le résultat obtenu. Une comparaison avec un cycle de centrale à flamme peut alors être faite, ou encore avec un cycle de Carnot.



3.5 Etudes de sensibilité

Une fois le modèle construit et paramétré, de nombreuses études de sensibilité peuvent être réalisées par les élèves. Ils peuvent notamment jouer sur le débit du caloporteur, la température de sortie du champ de capteurs (en conservant un écart constant avec celle de surchauffe de la vapeur), la pression du cycle vapeur, le type de capteur solaire...

3.6 Dimensionnement technologique

Une activité envisageable si les élèves disposent de suffisamment de temps est de leur demander de calculer des ordres de grandeur de dimensionnement du système (surfaces d'échange, sections de passage...), en estimant les pertes de charge dans les canalisations et les échangeurs, et en modifiant le modèle en conséquence pour affiner les choses.

4) Variantes

Nous proposons ici quelques variantes, mais de nombreuses autres peuvent être imaginées, en fonction du temps disponible, du niveau des élèves, de leur nombre, et des objectifs pédagogiques poursuivis.

4.1 Prise en compte d'un appoint dans le modèle

En s'inspirant de la séance S27⁵ qui montre comment modéliser et paramétrer un cycle de centrale à vapeur avec prélèvement et resurchauffe, les élèves pourront introduire un prélèvement dans le cycle étudié, et comparer les performances auxquelles ils parviennent avec celles des cycles sans appoint ni prélèvement.

4.3 Modèle de capteur solaire à concentration plus précis

Une autre activité possible est de demander aux élèves de développer un modèle de capteur solaire à concentration plus précis que celui retenu, qui est basé sur l'hypothèse de pertes thermiques fonction de l'écart entre la température moyenne du fluide dans les capteurs et la température ambiante.

Pour cela, ils considéreront un modèle différentiel où l'hypothèse précédente est valable localement. L'intégration des équations ne pose pas de problème majeur mais doit être faite proprement.

Il devient alors possible de leur demander de modifier la classe externe, mais cela suppose un investissement en temps important de leur part pour bien maîtriser les techniques correspondantes, qui sont expliquées dans la séance Diapason S07_ext.

4.4 Etat de l'art des technologies utilisables pour la conversion thermodynamique de l'énergie solaire

Si l'objectif est que les élèves approfondissent leurs connaissances sur l'énergie solaire, il est possible de leur demander de réaliser un état de l'art succinct des technologies utilisables pour la conversion thermodynamique de l'énergie solaire, en se basant sur la littérature existante, assez abondante.

4.5 Recherche d'un optimum pour la température de captation

Pour optimiser le cycle, un compromis doit être trouvé entre la température de surchauffe de la vapeur et le rendement de captation solaire. Nous avons vu que ce dernier est une fonction parabolique décroissante de la température moyenne dans le capteur, alors que l'exergie maximale de la vapeur d'eau est une fonction croissante de la température de la vapeur. On vérifiera par un raisonnement global que, pour une centrale SEGS utilisant les capteurs Luz dont les caractéristiques sont données ci-dessus, la température de fonctionnement optimale est proche des valeurs technologiquement admissibles indiquées dans l'énoncé.

4.6 Bilan exergetique du cycle

Il est enfin possible de demander aux élèves de dresser le bilan exergetique du cycle, s'ils disposent de suffisamment de temps.

La séance Diapason S06⁶ leur fournira si nécessaire des explications sur la manière de procéder, la séance S28⁷ étant consacrée au bilan exergetique du cycle à vapeur simple.

5) Fichiers de travail, recommandations

5.1 Fichiers de travail

Les fichiers de travail suivants sont joints au dossier dans l'archive SEGS.zip :

⁵ Séance S27 : <http://www.thermoptim.org/SE/seances/S27/seance.html>

⁶ Séance S06 : <http://www.thermoptim.org/SE/seances/S06/seance.html>

⁷ Séance S28 : <http://www.thermoptim.org/SE/seances/S28/seance.html>

- code des classes externes "solar concentrator" et "Dowtherm A"
- fichiers extThopt.zip et extUser.zip contenant ces classes externes
- fichier inth.zip contenant les textes en français
- fichiers de projet et de schéma du modèle Thermoptim de la centrale sans appoint
- fichiers de projet et de schéma du modèle Thermoptim de la centrale avec appoint

5.2 Recommandations

Il faut que l'enseignant vérifie bien que les élèves ont à leur disposition dans leur environnement de travail Thermoptim les classes externes dont ils auront besoin.

Le plus simple pour cela est de lancer Thermoptim, puis d'ouvrir l'écran du visualisateur de classes externes (menu Spécial du simulateur). Les classes y étant regroupées par type, le Dowtherm A doit apparaître parmi les corps, et le "solar concentrator" parmi les transfos, comme sur la figure 5.1.

Si l'une des classes manque, remplacez les fichiers extThopt.zip, extUser.zip et inth.zip par ceux qui sont fournis dans l'archive SEGS.zip pour les élèves devant travailler sur ce TD. Sils sont présents, il est inutile d'effectuer ce changement.

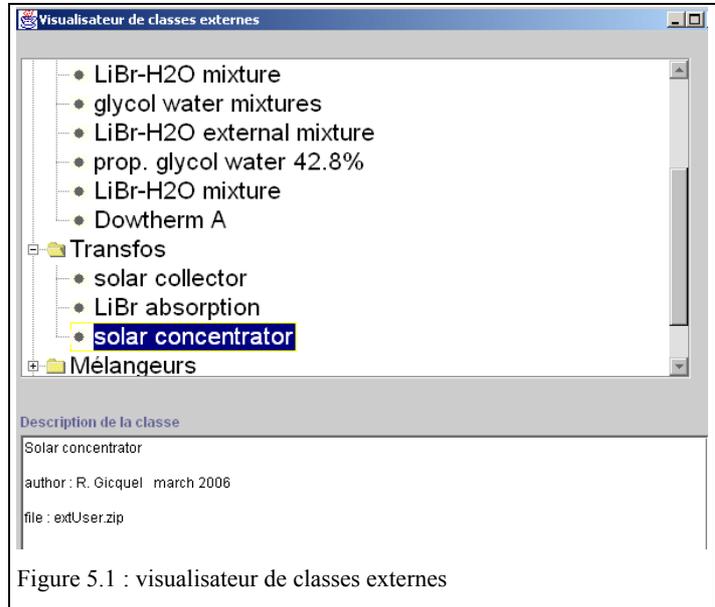


Figure 5.1 : visualisateur de classes externes