

Fiche-guide de TD sur la modélisation de centrales OTEC à cycle fermé et ouvert

1) Objectifs du TD

L'objectif du projet est d'étudier le fonctionnement de centrales électriques (OTEC pour Ocean Thermal Energy Conversion) utilisant le gradient thermique des océans (figure 3.1) et de montrer comment on peut les modéliser de manière réaliste avec Thermoptim.

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.

Les cycles OTEC ont pour vocation de générer de l'électricité dans les eaux chaudes tropicales. Deux grands types de cycles sont utilisés : les cycles fermés et les cycles ouverts, inventés par deux français, respectivement Jacques d'Arsonval en 1881 et son élève Georges Claude en 1940, qui procéda à une première réalisation.

Quoique techniquement valides, les cycles OTEC ne sont pas encore rentables sur le plan économique. Des prototypes de diverses puissances ont été réalisés ou sont envisagés, notamment à Hawaï et à Tahiti.

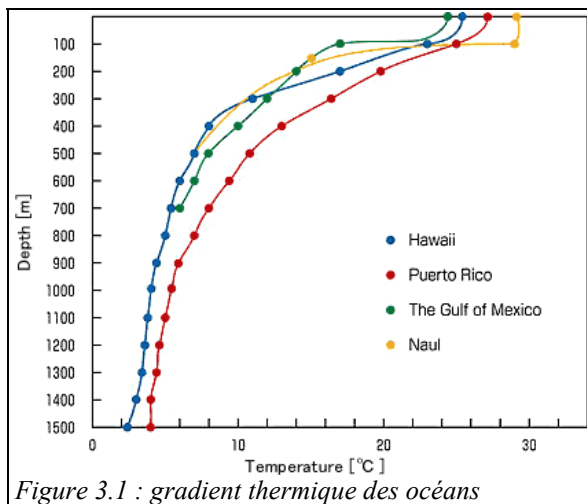


Figure 3.1 : gradient thermique des océans

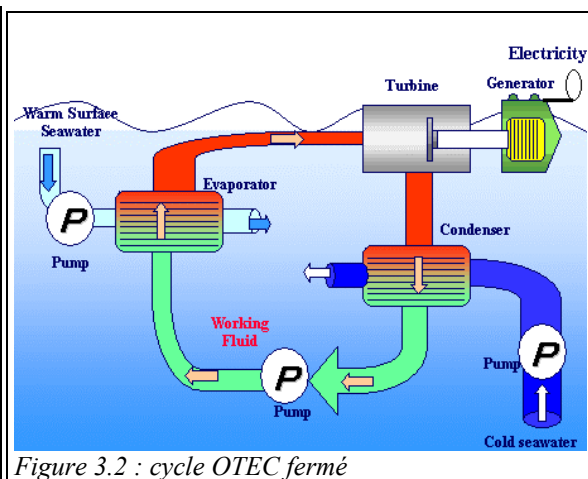


Figure 3.2 : cycle OTEC fermé

Dans tous les cas, la nécessité de véhiculer de très grands débits et de pomper l'eau froide à très grande profondeur induit des consommations d'auxiliaires importantes.

Les cycles fermés (figure 3.2) utilisent les eaux chaudes à environ 26 °C pour faire évaporer un liquide qui bout à une très basse température, tel que l'ammoniac ou un fluide organique. La vapeur produite entraîne une turbine, puis est condensée par échange thermique avec de l'eau froide à environ 4 °C provenant des couches profondes de l'océan.

Dans les cycles ouverts (figure 3.3), les eaux chaudes à environ 26 °C sont détendues dans une enceinte à basse pression (on parle de flash), ce qui permet d'en évaporer une petite fraction (de

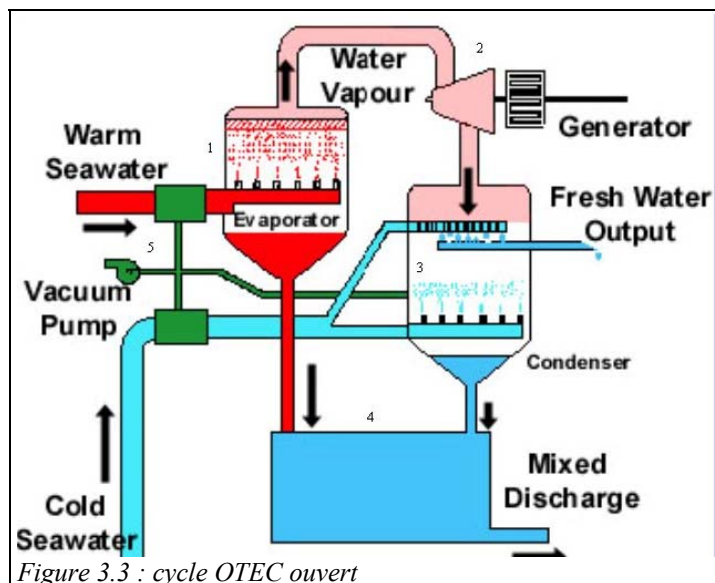


Figure 3.3 : cycle OTEC ouvert

l'ordre de 5 %). La vapeur produite entraîne une turbine, puis est condensée dans une enceinte à très basse pression par échange thermique avec de l'eau froide à environ 4 °C provenant des couches profondes de l'océan. Le condensat est de l'eau presque pure, qui peut être utilisée pour l'alimentation.

Le cycle ouvert présente donc l'avantage de produire à la fois de l'électricité et de l'eau douce.

Le schéma de la figure 3.3 montre le fonctionnement d'un cycle OTEC ouvert. Il met en jeu cinq éléments : un évaporateur noté 1, une turbine, 2, un condenseur (3), un bassin de collecte de l'eau de mer utilisée, et une pompe à vide 5.

L'eau chaude est pompée en surface et portée à une certaine hauteur, puis elle est injectée dans l'évaporateur où règne une légère dépression déterminée par la hauteur de la colonne d'eau entre l'évaporateur et le bassin de collecte. Du fait de la différence de pression, l'eau subit un laminage isenthalpique et une petite fraction est vaporisée, puis dirigée vers la turbine.

Dans le condenseur règne une pression inférieure à celle de l'évaporateur, assurée par la pompe à vide et la hauteur de la colonne d'eau entre le condenseur et le bassin de collecte. La turbine détend la vapeur produite dans l'évaporateur en produisant de la puissance mécanique, qui est ensuite condensée par échange avec l'eau froide, produisant ainsi de l'eau douce.

Les eaux froide et chaude mélangées dans le bassin de collecte sont réinjectées dans la mer à une profondeur d'une soixantaine de mètres.

Ce TD comporte deux parties :

- la première, relativement simple, concerne le cycle OTEC fermé et 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
- la seconde, un peu plus complexe, traite du cycle OTEC ouvert. Elle permet aux élèves d'approfondir la notion de flash.

2) Références

Nous vous recommandons le site de Luis A. Vega à Hawaï : <http://www.hawaii.gov/dbedt/ert/otec/> qui comporte de nombreux renseignements utiles, fournis par l'un des rares experts à avoir travaillé sur ces cycles. Un document de L. Vega est joint à cette fiche-guide.

3) TD principale

3.1 Cycle OTEC fermé

Le cycle thermodynamique est relativement simple : il s'agit d'un cycle de Rankine intermédiaire, dont la modélisation dans Thermoptim ne pose pas de problème particulier. L'objectif du travail est de modéliser un tel cycle et d'en calculer le rendement, puis d'en dresser le bilan exergétique. On cherchera, parmi les fluides thermodynamiques disponibles dans Thermoptim (ammoniac, butane, propane, R134a), celui qui conduit aux meilleures performances.

Le dimensionnement des échangeurs de chaleur est bien évidemment critique compte tenu du faible écart de température entre les sources chaude et froide. Les valeurs des pincements doivent être aussi faibles que possible tout en restant réalistes. Bien évidemment, lorsque l'on cherche à comparer les performances de cycles utilisant différents fluides, les valeurs des pincements doivent être à peu près les mêmes.

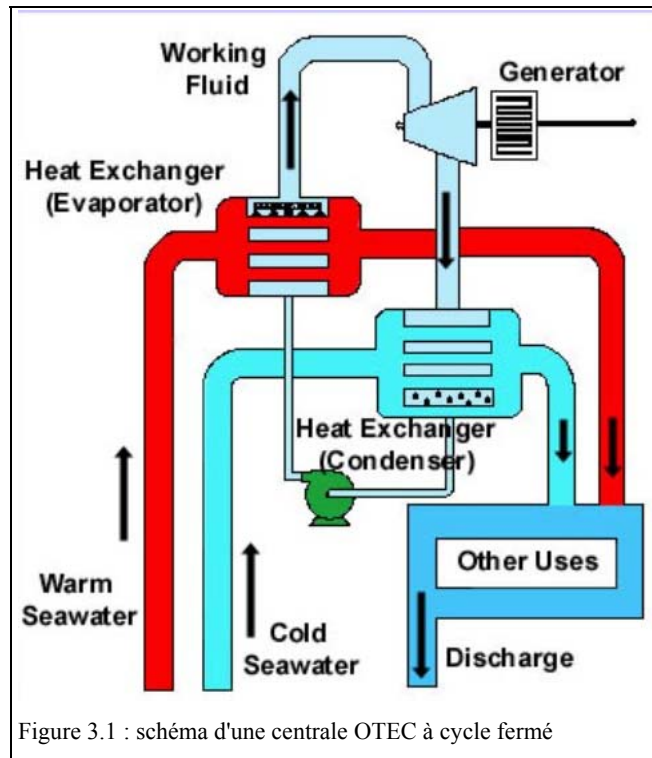


Figure 3.1 : schéma d'une centrale OTEC à cycle fermé

On pourra constater que, bien que le rendement énergétique du cycle fermé OTEC soit très faible ($< 3\%$), son rendement exergétique peut être correct.

Le débit d'eau chaude est égal à $27\,000\text{ kg/s}$, sa température est de $26\text{ }^\circ\text{C}$, et la température de l'eau froide est égale à $4\text{ }^\circ\text{C}$.

L'ensemble des autres valeurs doit être déterminé, en justifiant les hypothèses faites. On estimera les ordres de grandeur de dimensionnement du système (surfaces d'échange, sections de passage...), en n'oubliant pas de tenir compte de la puissance de pompage, a priori non négligeable.

Les 7 dernières étapes de la séance Diapason ENR01¹ constituent une petite introduction aux cycles OTEC, que les élèves pourront utilement consulter.

La modélisation dans Thermoptim de la centrale OTEC à cycle fermé conduit à un schéma du type d'une centrale à vapeur. Le rendement est très faible compte tenu du petit écart de température entre les deux sources.

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), la seule difficulté concerne la construction et le paramétrage de l'échangeur de chaleur en trois parties.

La manière de résoudre cette difficulté est expliquée en détail en fin de séance S18³ 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.

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

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

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

³ Séance S18 : <http://www.thermoptim.org/SE/seances/S18/seance.html>

3.2 Cycle OTEC ouvert

Un schéma d'un cycle OTEC ouvert à un seul flash est donné figure 3.3, les données relatives à l'état de certains points étant fournies ci-dessous :

point	T (°C)	P (bar)	x		débit (kg/s)
1	26	1	0	eau chaude	6156
2	23,39	0,0288	?	eau froide	2702
3	23,39	0,0288	1	eau distillée	?
4	23,39	0,0288	0		
5	?	0,0129	?		
6	4	1	0		
7	?	1	0		
7'	9,5	0,0129	0		

L'ensemble des autres valeurs doit être déterminé, en justifiant les hypothèses faites (les propriétés thermodynamiques de l'eau salée seront assimilées à celle de l'eau pure).

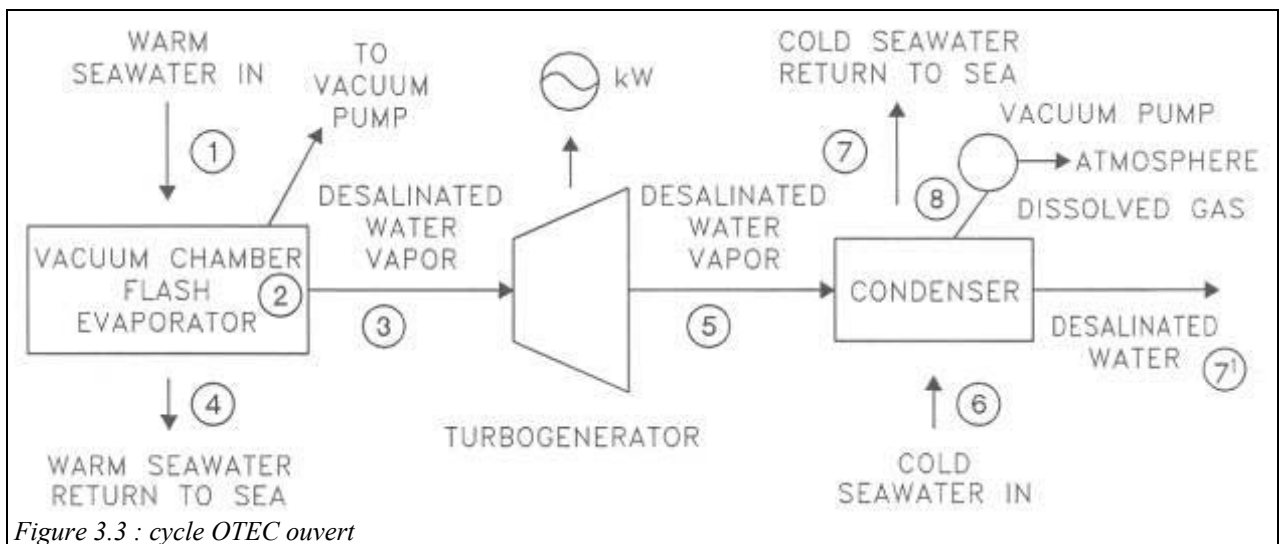


Figure 3.3 : cycle OTEC ouvert

Un modèle possible sous Thermoptim de ce cycle est donné figure 3.4.

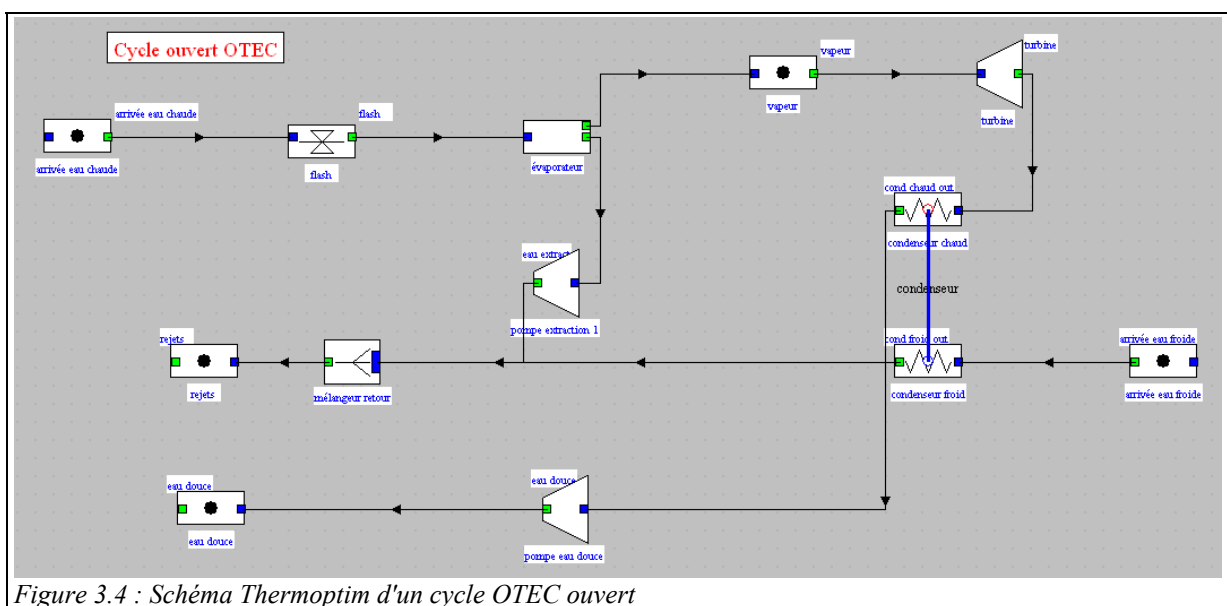


Figure 3.4 : Schéma Thermoptim d'un cycle OTEC ouvert

Comme dans la première partie, l'objectif du travail est de modéliser un tel cycle et d'en calculer le rendement, puis d'en dresser le bilan exergetique. On estimera les ordres de grandeur de dimensionnement du système (surfaces d'échange, sections de passage...), en n'oubliant pas de tenir compte de la puissance de pompage, a priori non négligeable.

Sans être très complexe, la compréhension de ce cycle par les élèves n'est généralement pas immédiate. Même s'ils ont étudié la détente isenthalpique d'un frigorigène dans une machine frigorifique, ils ont souvent du mal à réaliser que la détente de l'eau de mer va en vaporiser une petite partie.

Pour réaliser le vide partiel nécessaire d'une part au flash, et d'autre part à l'échappement de la turbine, on utilise la variation de pression hydrostatique due à la différence d'altitude des collecteurs d'eau. L'eau de mer chaude admise est pompée à quelques mètres au-dessus du niveau de la mer, tandis que le collecteur de sortie du flash se situe un peu plus bas, et celui en sortie de turbine encore plus bas.

On se référera au document de L. Vega déjà mentionné pour plus de détails.

Pour calculer la puissance payante de manière simple, on a ici sélectionné comme énergie payante celle fournie au condenseur, ce qui n'est pas tout à fait exact. De plus, l'eau douce produite n'est pas comptabilisée dans ce bilan, ce qui fausse un peu les résultats.

3.3 Représentation dans des diagrammes thermodynamiques

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. Il peut notamment être intéressant de visualiser le flash sur un tel diagramme pour que les élèves comprennent bien ce qui se passe dans cet appareil.

4) Variantes

Ce TD comportant déjà deux variantes, nous n'en proposons ici que deux autres, mais de nombreuses alternatives peuvent être imaginées, en fonction du temps disponible, du niveau des élèves, de leur nombre, et des objectifs pédagogiques poursuivis.

4.1 Etude d'un cycle ouvert à double étage de flash

Le document joint en annexe de L. Vega présente un cycle ouvert à double étage de flash, dont un schéma est donné figure 4.1 donnée page suivante. L'étude de ce cycle plus complexe, avec les données indiquées sur le schéma et celles fournies dans le document, constitue une variante tout à fait intéressante, quoique un peu plus complexe.

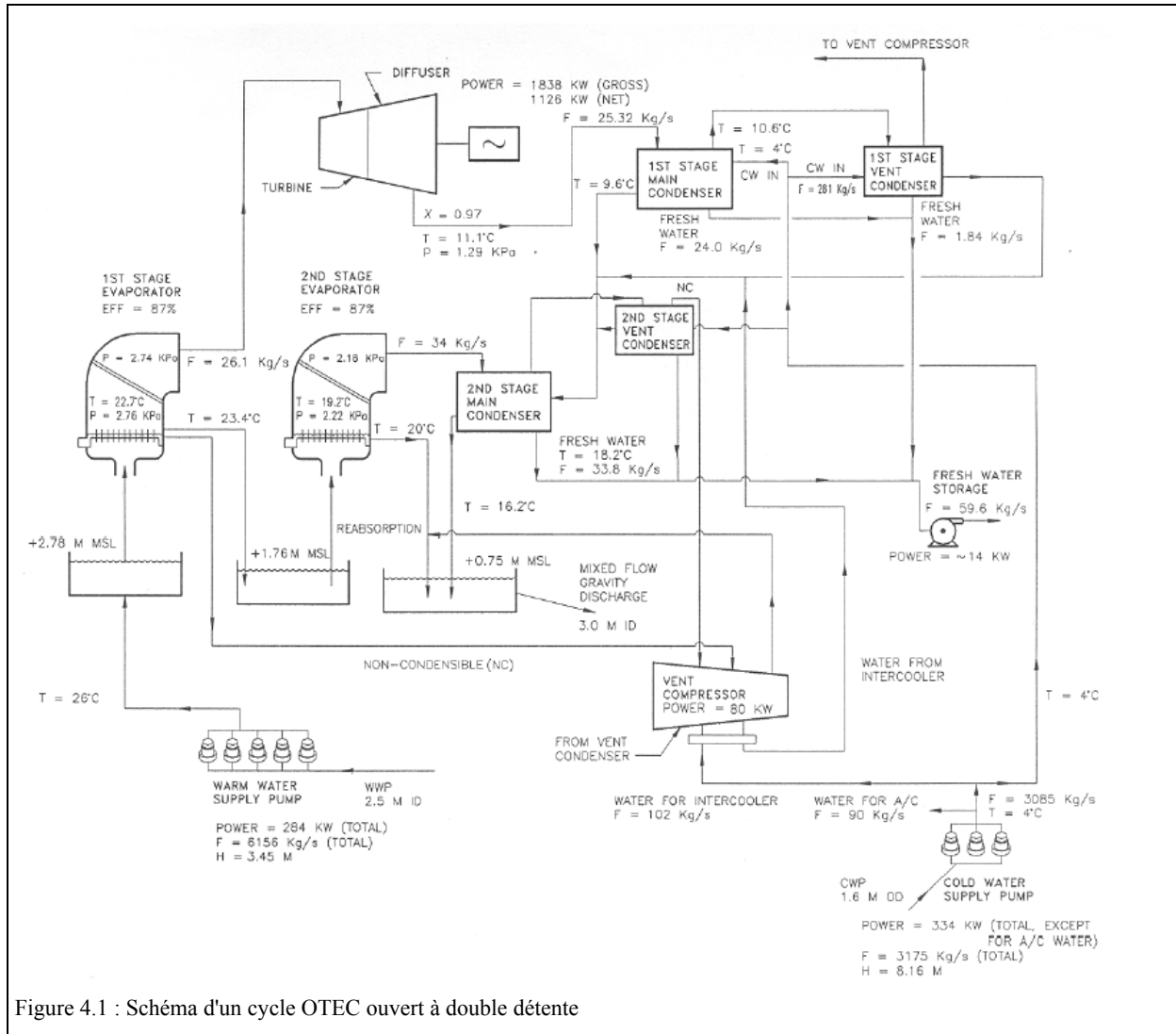
4.2 Bilan exergetique du cycle

Il est enfin possible de demander aux élèves de dresser le bilan exergetique du cycle, s'ils disposent de suffisamment de temps. Le grand intérêt de ce travail est de leur montrer que des cycles à très faible rendement (du fait du faible gradient thermique disponible) peuvent malgré tout avoir un assez bon rendement exergetique.

La séance Diapason S06⁴ leur fournira si nécessaire des explications sur la manière de procéder, la séance S28⁵ étant consacrée au bilan exergetique du cycle à vapeur simple.

⁴ Séance S06 : <http://www.thermoptim.org/SE/seances/S06/seance.html>

⁵ Séance S28 : <http://www.thermoptim.org/SE/seances/S28/seance.html>



5) Fichiers de travail

Le fichier de travail suivant est joint au dossier :

- document Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) par L. A. Vega, Ph.D., Hawaii, USA (OTECbyVega_with_photos.pdf)