PROJET RREFlex :

Outil Logiciel Robuste pour la synthèse de Réseaux d'Echangeurs Flexibles

G. Hétreux[a], R. Hétreux[a] , P.Floquet[a], L. Payet[a], Olivier Baudouin[b], Quentin Duval[b], T. Lasuye[c] ,B. Tauzin[d]

a) Laboratoire de Génie Chimique , UMR CNRS 5503, département Procédés et Systèmes Industriels, Université de Toulouse, INPT – ENSIACET
b) ProSim S.A. - c) Vynova - d) Rousselot

De l'audit énergétique à l'optimisation de l'efficacité énergétique des sites industriels :
Quelles méthodologies ? Quels outils ?

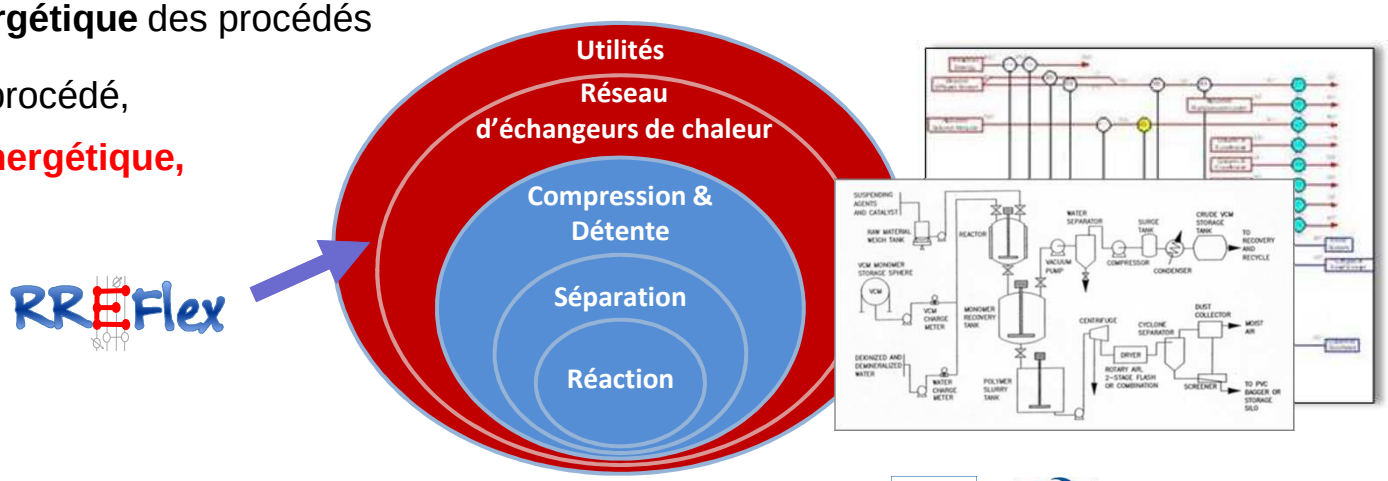
JOURNEE DES GT IEP/ENERGIE – 9 Juin – Paris

Fiche d'identité du projet

Titre : RREFlex : outil Robuste pour la synthèse de Réseaux d'Echangeurs de chaleur Flexibles

Objectif : **Efficacité énergétique** des procédés

- Optimisation du procédé,
- **Récupération énergétique,**



Cadre : 8ème AMI « *Efficacité Energétique dans l'Industrie* » ADEME/TOTAL

Date de début : 01/10/2015

Durée : 38 mois

Montant total : 807 k€

Partenaires : Laboratoire de Génie Chimique, ProSim, VYNOVA, Rousselot

Philosophie du projet RREFlex

- **Synthèse de réseaux d'échangeurs de chaleur :** Problématique complexe induisant une **forte composante combinatoire**, notamment pour des problèmes de dimension industrielle (plusieurs dizaines de courants chauds et froids)

- Abondante littérature relative à la synthèse de réseaux d'échangeurs,
- Pourtant, peu d'outils logiciel intégrateur …

PROJET RREFlex

- OBJECTIF n°1 : Proposer une **méthodologie** unificatrice et générique de synthèse de **R**éseaux d'**E**changeurs de chaleur **Flex**ibles.
- OBJECTIF n°2 : Développer un **prototype logiciel** mettant en œuvre cette méthodologie.

Philosophie du projet RREFlex

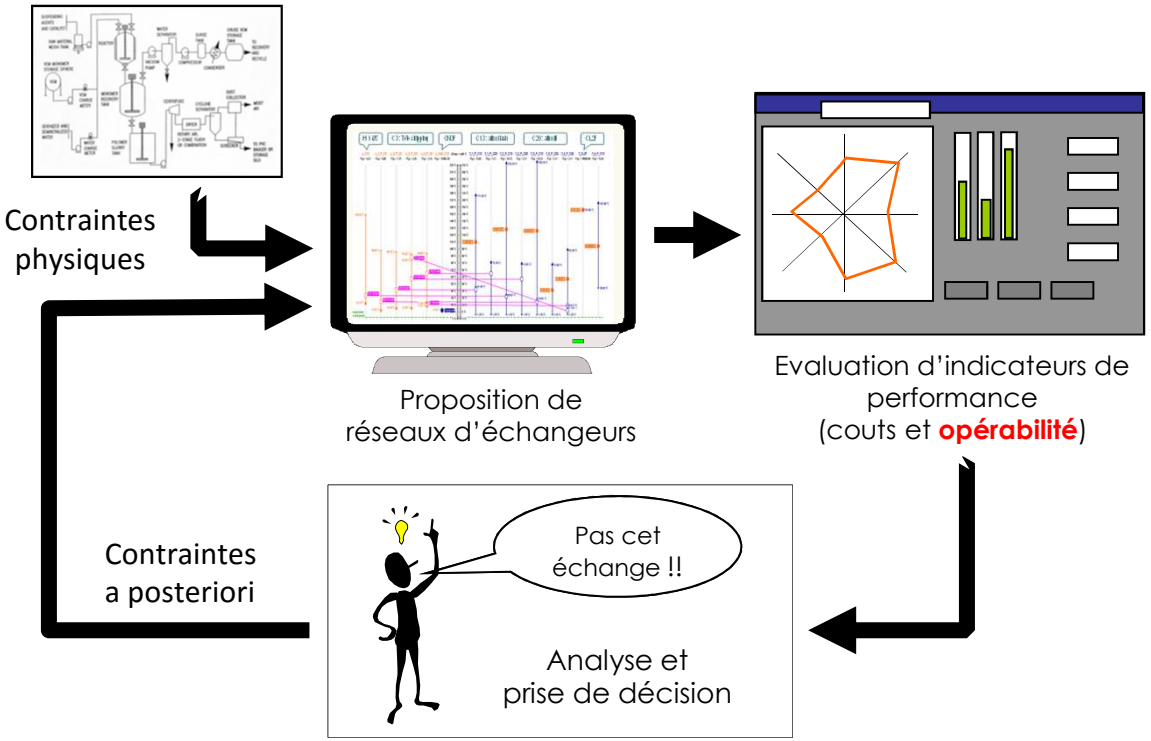
***Intérêt* et *inconvénient* d'un Système intégré :**

- ✚ Amélioration de l'efficacité énergétique du procédé,
  - ⇨ Compromis CAPEX / OPEX
- ▬ Pilotage et opérabilité du procédé plus **complexe** et plus **sensible** aux fluctuations et aux changements de points de fonctionnement,
  - ⇨ Critères plus rarement pris en compte

⇩

Objectif du projet RREFlex

Construire des réseaux d'échangeurs présentant des qualités d'**opérabilité** qui permettent d'atteindre effectivement les performances économiques visées dans des **conditions réelles** de fonctionnement.



Méthodologie : développer un **Outil d'aide à la décision** permettant de construire des solutions :

- sur critères économiques,
- dont l'opérabilité est quantifiée,
- de manière **itérative** dans lequel l'exploitant joue un rôle décisionnel important

Notion de FLEXIBILITE

OPERABILITE

Contrôlabilité

Propriété liée à la
conduite temps réel *du système*

Capacité à pouvoir faire évoluer le système d'un état de fonctionnement x_0 à un autre état x_1 en définissant une loi de commande

⇨ Nécessite une analyse des propriétés dynamiques du système

Les systèmes de commande mis en place sont supposés être capables de maintenir ou d'atteindre les consignes fixées
(au sens de l'« automatique »)

Flexibilité

Propriété liée au
pilotage court et moyen terme *du système*

Capacité d'un système à fonctionner pour un nombre fini de points de fonctionnement

⇨ **Robustesse *(perturbation d'un point de fonctionnement)***

⇨ **Résilience *(points de fonctionnement correspondant à un mode dégradé)***

⇨ **Adaptabilité *(points de fonctionnement multiples en mode nominal)***

⇨ **Gestion de l'intermittence**

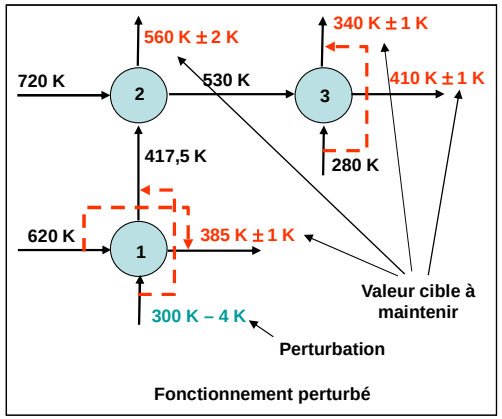
Synthèse d'un réseau flexible

ROBUSTESSE

- Pour un point de fonctionnement donné défini par des *intervalles de tolérance*, **capacité du système à absorber une perturbation** de faible amplitude (« bruit » sur une grandeur physique) **sans modification** des débits d'utilités et des courants.

Analyse visant à identifier les courants les plus sensibles à des perturbations bien identifiées

Réalisée en s'appuyant sur l'**arithmétique des intervalles**

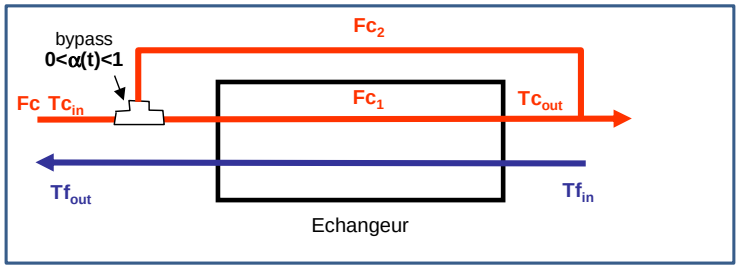


RESILIENCE

- Pour un point de fonctionnement donné, **capacité à absorber une perturbation** de fortes amplitudes (hors des intervalles de tolérance), **à se réorganiser** et **à continuer à fonctionner de la même manière** qu'avant, en agissant sur les débits ou la topologie du réseau.

Synthèse de réseaux rendus peu sensibles à un ensemble bien identifié de fluctuations :

- par placement et dimensionnement des utilités,
- par modification des quantités de chaleur échangées au au moyen de by-pass



Ces deux propriétés permettent d'analyser et de quantifier la **flexibilité intrinsèque** du réseau d'échangeurs de chaleur

Synthèse d'un réseau flexible

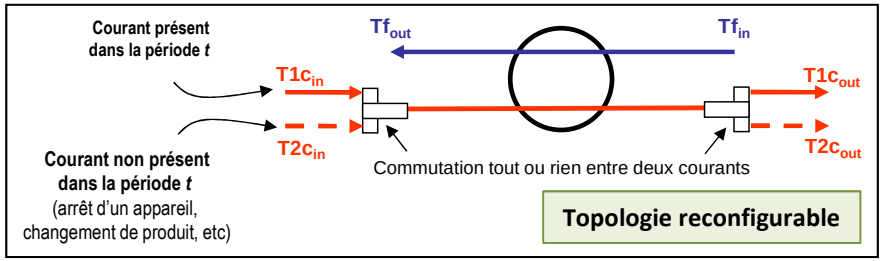
ADAPTABILITE

- En fonctionnement normal, capacité du réseau à **fonctionner de manière satisfaisante pour plusieurs points de fonctionnement différents** qui peuvent évoluer au cours du temps (fabrication de différentes gammes de produits, changement de campagnes, fonctionnement calendaire, changement de mode de marche, etc.)

⇨ Recherche d'un réseau correspondant au meilleur compromis de récupération énergétique pour les différents points de fonctionnement

Résolution de **problèmes multi-scenario/multi-période**

- à topologie fixée et actions sur les utilités et courants,
- à topologie configurable



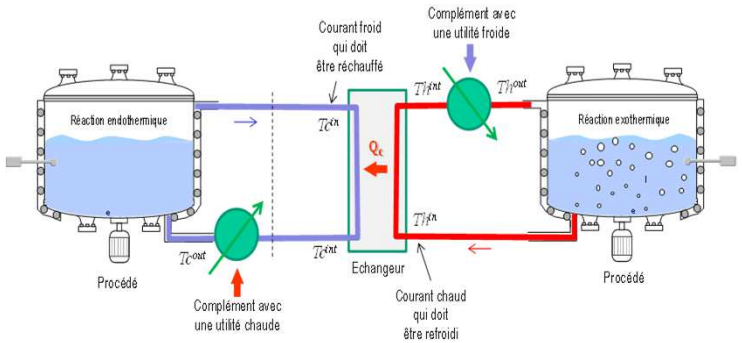
GESTION DE L'INTERMITTENCE

- En fonctionnement normal, capacité du réseau à fonctionner de manière satisfaisante malgré une **inadéquation temporelle des sources et des puits d'énergie.**

⇨ Problématique fondamentale pour l'**intégration énergétique des procédés discontinus**

Résolution de **problèmes multi-scenario/multi-période**

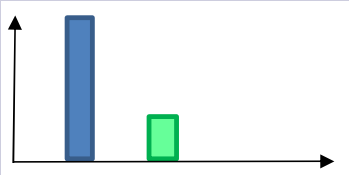
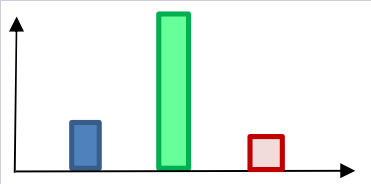
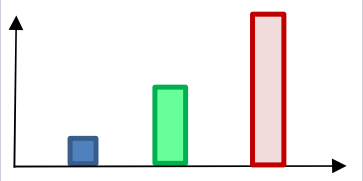
- basée sur une intégration énergétique directe,
  ⇨ actions sur la conduite du procédé (*ordonnancement*)
- basée sur l'exploitation de **systèmes de stockage** (capacité, localisation, délai de captation et restitution, etc.)



Caractéristiques des sites des partenaires industriels

Sites des partenaires industriels :

- présentant des **consommations énergétiques** et des **modes de production** différents
- couvrant la totalité des **problématiques de flexibilité** identifiées dans le projet

	Tessenderlo (MVC)	**Mazingarbe (PVC)**	**Rousselot (Gélatines)**
Secteur	Pétrochimie	Pétrochimie	Agro-Alimentaire
Nombre de courants chauds / froids	23 courants chauds (×2) 17 courants froids (×2)	27 courant chauds 23 courants froids	18 courants chauds 35 courants froids
Consommation vapeur	2t / t_{MVC}	1 t / t_{PVC}	13 t/ $t_{gelatine}$
Type de production	o Purement continu o Plusieurs points de fonctionnement (fonction de la demande et des prix de l'énergie)	o Mixte o Plusieurs scenarii d'intégration possibles o Plusieurs grades de produits o Pré-étude déjà réalisées (Projet ADEME)	o Purement discontinu o Points de fonctionnements mulltiples (multi-produits – matière première variable) o Intégration directe impossible (stockage)
Fonctionnalités validées **Robustesse/Résilience** **Adaptabilité** **Gestion intermittence**			

Benchmark d'études de cas

Constitution d'un **benchmark d'études de cas** afin de valider les évolutions du modèle et les différentes versions du logiciel :

- de dimension croissante (*exemples académiques* ⇨ *cas industriels*)
- intégrant des spécificités (*division (ou pas) de courant, déséquilibre courant chaud /froid, utilités, etc*)

	CARACTERISTIQUES des Etudes de cas			Résultats		
		Nbre CC/CF	Nbre intervalles	CAE	Nbre échangeurs	Temps CPU (s)
01	Exemple simple	2 / 2				
02	Exemple simple avec nécessité de diviser les courants pour atteindre le MER	5 / 2				
03	Exemple complexe (nombre et division de courants)	11 / 3				
04	Exemple complexe – Traité dans la littérature	13 / 7				
05	Exemple complexe – Traité dans la littérature	22 / 17				
06	Exemple de dimension industrielle	24 / 31				
07	Exemple de dimension industrielle	29 / 25				

Versionning du logiciel RREFlex

3 VERSIONS MAJEURES

Projet RREFlex

- **RREFlex 0** — Juin 2016
  - **RREFlex 0.0** → Version de départ
  - **RREFlex 0.1** → Règles heuristiques pour le filtrage des courants éligible et la définition des paramètre de résolution afin de réduire la complexité du problème
- **RREFlex 1** — Déc 2016
  - **RREFlex 1.0** → Evaluation a posteriori des indicateurs standards *(CAPEX, Température et nature des utilités, etc.)* et particuliers (*couplage, poids d'un échange, etc.)*
  - **RREFlex 1.1** → Génération automatique de solutions multiples
  - **RREFlex 1.2** → Prise en compte de données « site » spécifiques
  - **RREFlex 1.3** → Mise en place de la boucle de rétroaction Développement d'interfaces entrée/sortie
- **RREFlex 2** — Mai 2018
  - **RREFlex 2.0** → Evaluation a posteriori de la flexibilité d'un réseau
  - **RREFlex 2.1** → Prise en compte explicite de la flexibilité (**perturbation,** stockage de l'énergie, modèle multi-période)
  - **RREFlex 2.2** → Prise en compte explicite de la flexibilité (**points de fonctionnement multiples**, analyse de sensibilité) - Développement interfaces entrée/sortie

Versionning du logiciel RREFlex

3 VERSIONS MAJEURES

Projet RREFlex

- **RREFlex 0** — **Juin 2016**
- **RREFlex 1** — **Déc 2016**
- **RREFlex 2** — **Mai 2018**

Prototype logiciel : méthodologie et architecture de base

- Modèle d'optimisation initial
- Connexion d'un programme C++ avec le solveur CPLEX
- Mise en ouvre d'heuristiques

Synthèse des réseaux d'échangeurs de chaleur

- D'un point de vue **méthodologique,** deux principales approches …

Approches « algorithmiques » basées sur des heuristiques	Approches « optimisation » basées sur la programmation mathématique
Pas de difficulté numérique	Optimisation globale du problème (exploration exhaustive des solutions) Prise en compte explicite de contraintes spécifiques Prise en compte explicite de diverses fonctions objectif
Nature de la solution fortement dépendante des choix successifs réalisés durant la procédure de calcul ⇨ Exploration non exhaustive des solutions Pas de fonction objectif explicite (recherche implicite du réseau correspondant au MER)	Peut induire des temps de calcul importants Modélisation non triviale pouvant nécessité des hypothèses simplificatrices

Programmation non linéaire mixte

Programmation linéaire mixte

- \+ Garantie de l'obtention d'une solution
- \+ Convergence plus rapide
- \- Modélisation parfois plus complexe

RREFlex 0.0 : Le modèle d'optimisation

- Découpage des courants en plusieurs **intervalles de température** dont le nombre et les bornes sont déterminées par le modèle d'optimisation

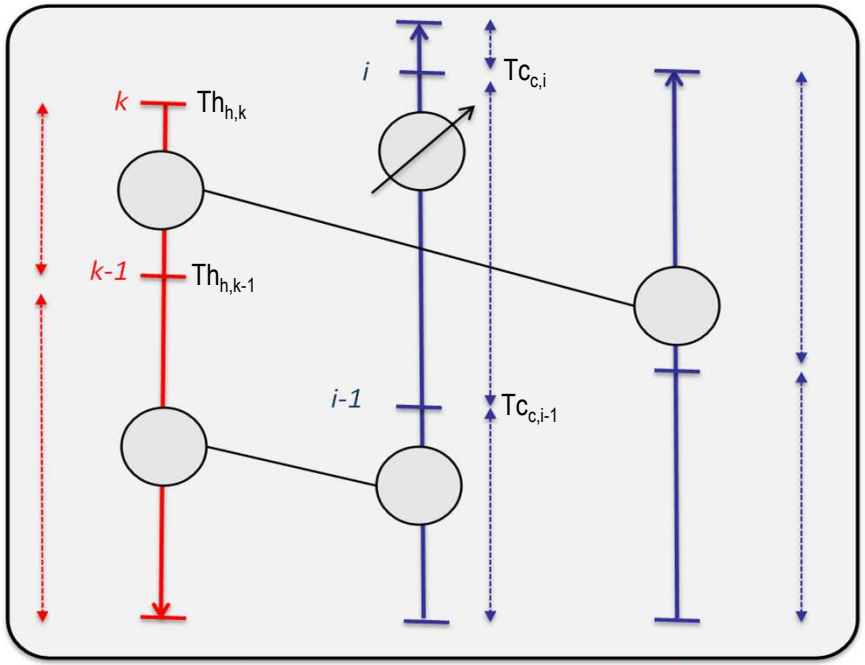
un intervalle	⇔	Part d'un courant participant à un échange de chaleur

Un intervalle *k* d'un courant chaud *h* peut échanger une quantité d'énergie $Q_{h,k,c,i}$ avec un intervalle *i* d'un courant froid *c* telle que :

$$Q_{h,k,c,i} = FCp_h\,(Th_{h,k} - Th_{h,k-1}) = FCp_c\,(Tc_{c,i} - Tc_{c,i-1})$$

$$Th_{h,k} \geq Tc_{c,i} + DTmin$$

$$Th_{h,k-1} \geq Tc_{c,i-1} + DTmin$$



NOTION D'INTERVALLE

- Pour maitriser l'**opérabilité du système intégré**, le nombre de couplage entre courants peut être fixé par l'utilisateur.

Pour cela, l'utilisateur peut fournir le nombre **N** maximum d'intervalles par courant ⇨ consiste à fixer le nombre maximum d'échange auxquels un courant peut participer,
Par défaut, nombre **N** fixé à 3,

RREFlex 0.0 : Le modèle d'optimisation

⇨ Exploitation de la **théorie des graphes** dans le but de :

- disposer d'un **support formel** permettant de déduire de manière systématique les contraintes du modèle d'optimisation,
- profiter **d'outils d'analyse et de résolution** supplémentaires,

modélisation du problème par un **graphe de flot biparti avec contraintes de potentiel** duquel est déduit l'ensemble des **contraintes de base** du **modèle d'optimisation MILP**

○ **sémantique** du graphe :

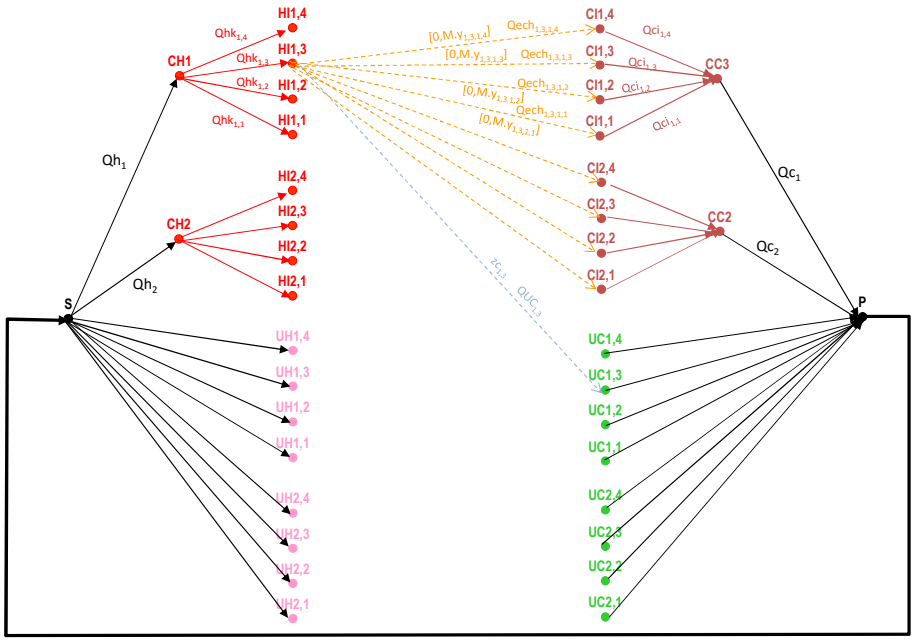
- courant ≡ *sommet* de type CH_h et CC_c
- *intervalle* d'un courant ≡ *sommet* de type $HI_{h,k}$ et $CI_{c,i}$
- utilité ≡ *sommet* de type $UH_{h,k}$ et $UC_{c,i}$
- quantité de chaleur ≡ *flux* des arcs incidents à un sommet
- *température de sortie* d'un intervalle ≡ *potentiel* du sommet

○ **problème d'affectation** entre 2 ensembles de sommets (⇨ *graphe biparti*) :

- à gauche, ensemble des intervalles des courant chauds,
- à droite, ensemble des intervalles des courant froids,

○ **problème de flot** visant à transmettre un maximum de chaleur des *courants chauds* vers les *courants froids* et à calculer les besoins en *utilités chaudes* et *froides* par conservation du flot

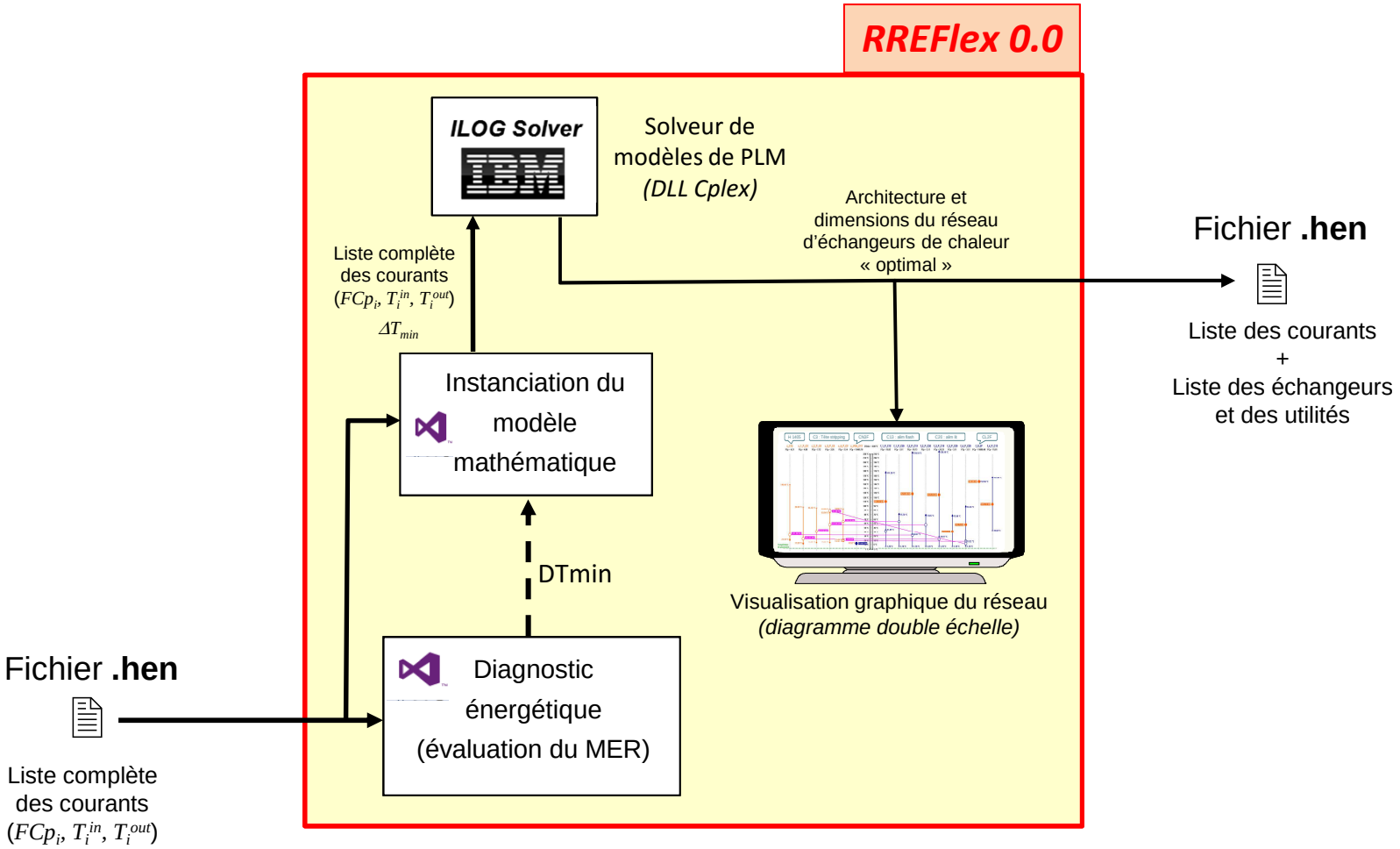
○ **contraintes de potentiel** pour respecter l'écart de température *DTmin* entre courants chauds ou froids



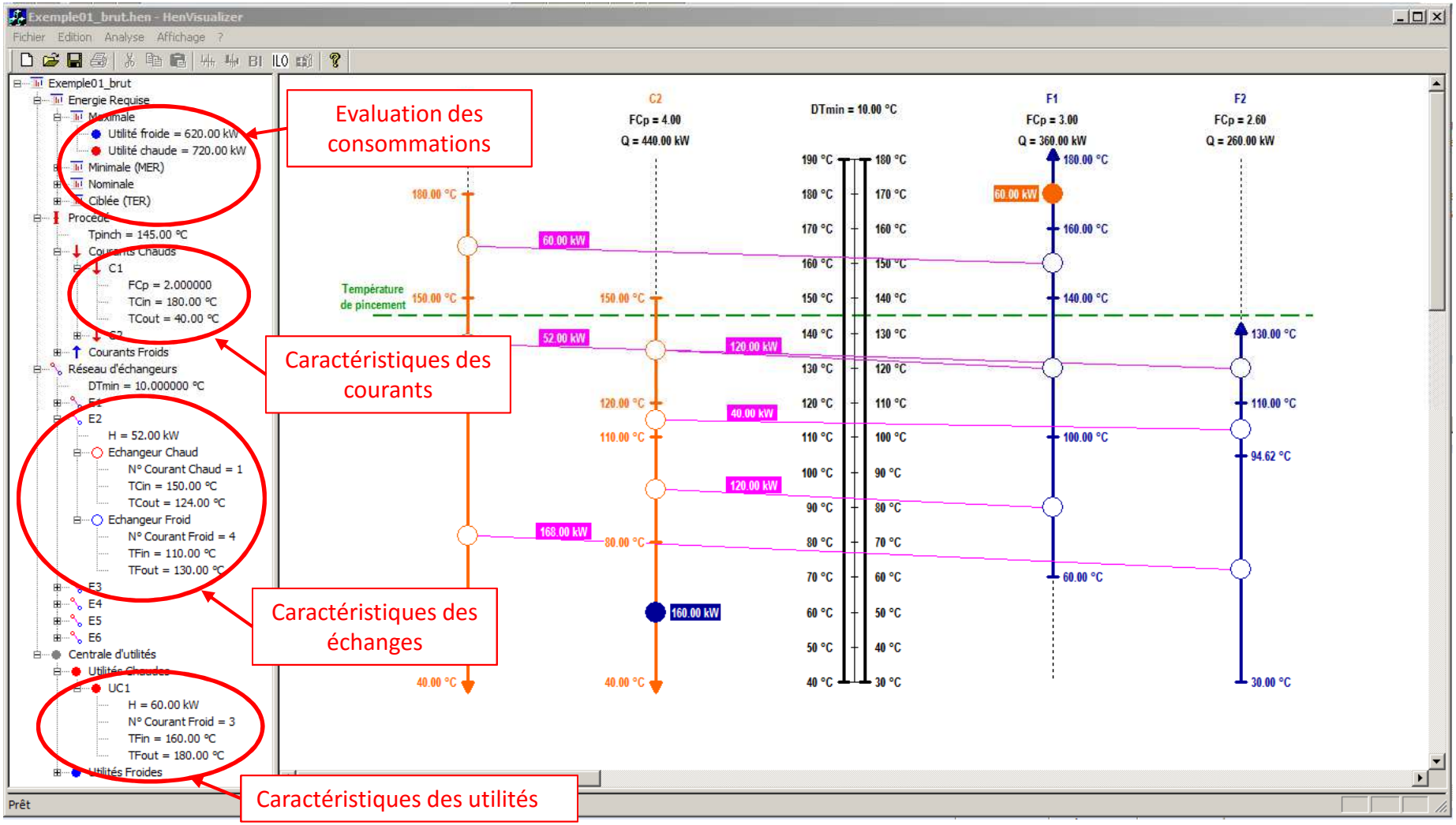
Cas d'un problème comportant :

- **2 courants chauds**
- **2 courants froids,**
- chacun participant au plus à **4 échanges**

RREFlex 0.0 : le prototype initial

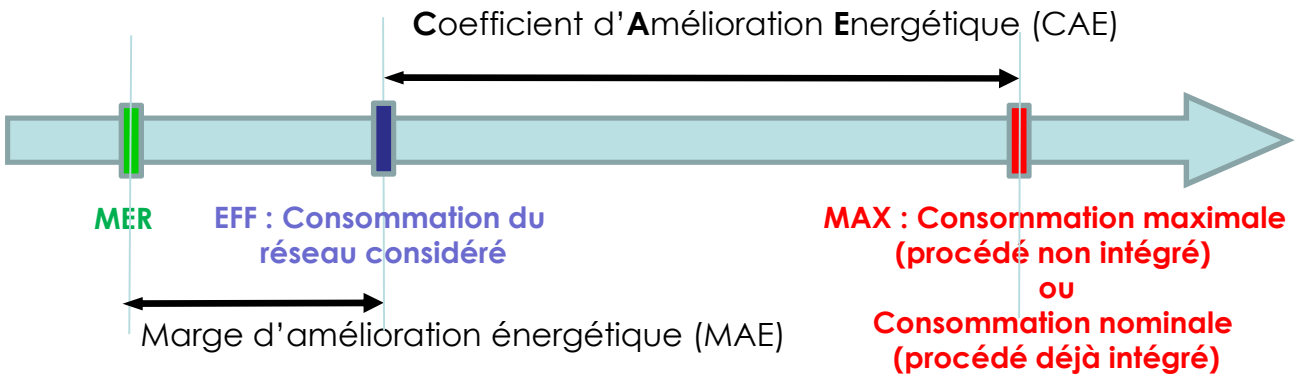


RREFlex 0.0 : le prototype initial



RREFlex 0.0 : Indicateur de performance

⇨ Actuellement, définition d'un indicateur permettant de juger de la « qualité » des solutions obtenues par rapport au réseau correspondant au MER



$$CAE = 1 - \frac{EFF - MER}{MAX - MER}$$

Indicateur permettant de quantifier l'économie atteinte grâce au réseau d'échangeur considéré par rapport à un procédé non intégré (ou partiellement intégré)

$$MAE = 1 - CAE$$

Indicateur permettant d'évaluer la marge de progression encore possible

* *Indicateurs identiques pour les utilités chaudes et froides*

RREFlex 0.0 : performances du modèle actuel

Modalités des tests

- **Critère** : minimiser la consommation en utilités chaudes et froides
- **Indicateurs** :
  - évaluation du Coefficient d 'Amélioration Energétique *(CAE)*
  - temps de résolution borné arbitrairement à 2min 30s (soit 150 s)
  - nombre de couplage *N* autorisé par courant : N=3 (par défaut) ou > 3

ETUDE DE CAS	CARACTERISTIQUES des CAS D'ETUDE			Résultats		
		Nbre CC / CF	Nbre intervalles défaut / >3	CAE défaut / >3	Nbre échangeurs défaut / >3	Temps CPU (s) Défaut / >3
01	Exemple simple	2-2	12 / 16	89 % / 100 %	5 / 8	1,7 / 1,95
02	Exemple simple (nécessite la division de courants)	5-2	15 / 28	75 % / 98 %	7 / 13	1,8 / *150.0*
03	Exemple complexe (nombre et division de courants)	11-3	29 / 68	60 % / 91 %	15 / 23	1,8 / *150.0*
04	Exemple complexe – Traité dans la littérature	13-7	60 / 80	87 % / 99,4 %	21 / 22	3,12 / *150.0*
05	Exemple complexe – Traité dans la littérature	22-17	117 / -	95,7 % / -	56 / -	*150.0 / -*
06	Exemple de dimension industrielle	24-31	165 / -	93 % / -	84 / -	*150.0 / -*
07	Exemple de dimension industrielle	29-25	162 / -	98 % / -	96 / -	*150.0 / -*

Bonne « qualité » des solutions obtenues (vis-à-vis du MER) avec des temps de calcul très acceptables

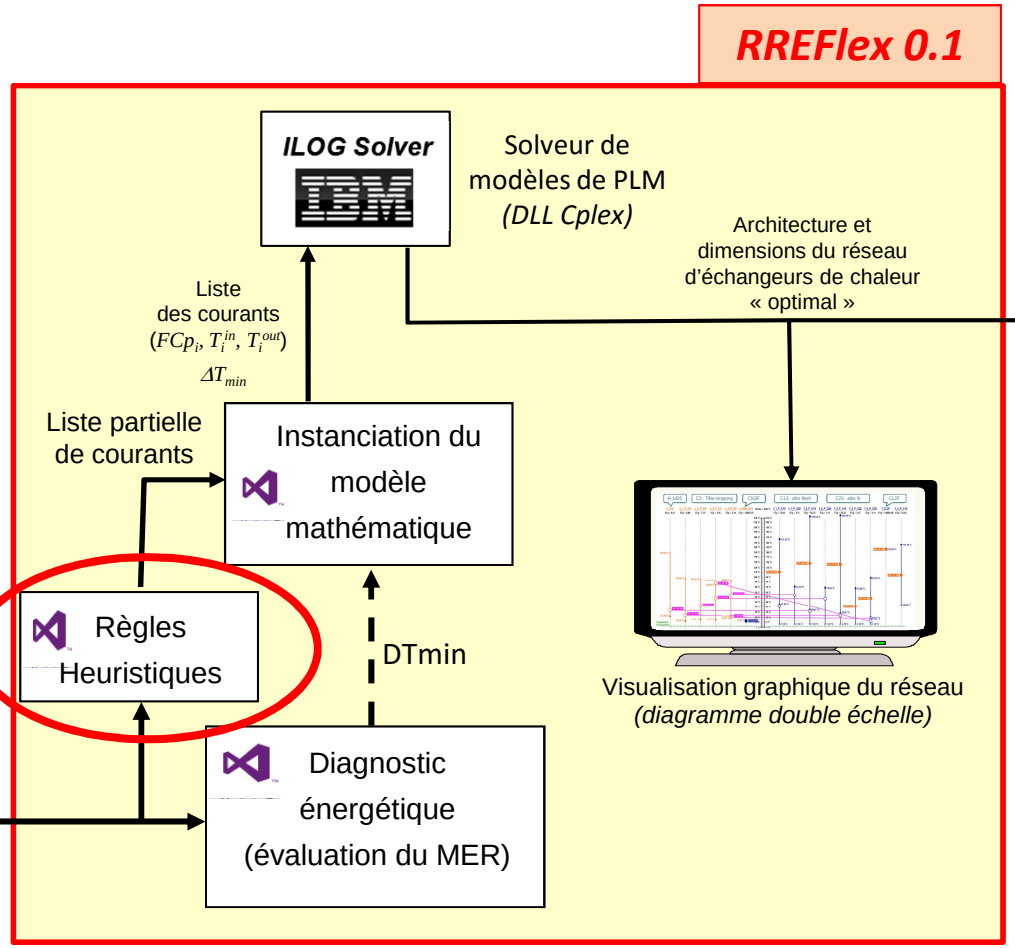
RREFlex 0.1 : introduction d'heuristiques

⇨ Avec l'avancée du projet, nos modèles d'optimisation ne pourront que se complexifier …

Anticipation des problèmes potentiels de temps de résolution par l'introduction d'**heuristiques** …

Introduction d'une phase de pré-processing visant :

- soit à réduire le nombre de courants à considérer,
- soit à évaluer de manière fine le nombre de couplage autorisé par courant



RREFlex 0.1 : introduction d'heuristiques

	SANS HEURISTIQUES					AVEC HEURISTIQUES				
	données		résultats			données		résultats		
ETUDE DE CAS	Nbre CC – CF initial	Nbre total intervalles	CAE	Nbre échangeurs	Temps CPU (s)	Nbre CC - CF	Nbre total intervalles	CAE	Nbre échangeurs	Temps CPU (s)
01	2-2	12 / 16	89 % / 100 %	5 / 8	1,7 / 1,95	2-2	12	93 %	5	5
02	5-2	15 / 28	75 % / 98 %	7 / 13	1,8 / *150.0*	2-2	7	89 %	7	9,8
03	11-3	29 / 68	60 % / 91 %	15 / 23	1,8 / *150.0*	8-3	8	58 %	15	2,6
04	13-7	60 / 80	87 % / 99,4 %	21 / 22	3,12 / *150.0*	7-5	45	62 %	20	2,3
05	22-17	117 / -	95,7 % / -	56 / -	*150.0 / -*	8-9	42	51 %	43	624
06	24-31	165 / -	93 % / -	84 / -	*150.0 / -*	2-6	18	15 %	60	2
07	29-25	162 / -	98 % / -	96 / -	*150.0 / -*	27-7	36	14 %	62	5

- Réduction significative des temps calcul
- mais perte de qualité des solutions obtenues ⇨ heuristiques probablement trop drastiques

Compromis qu'il faudra trouver dans la suite du projet …

CONCLUSION ET TRAVAIL A VENIR …

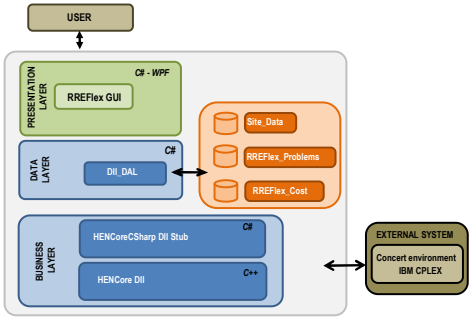
RREFlex

Un projet original qui vise à passer
de la **conception de réseaux d'échangeurs « théoriques »** à la **conception de réseaux « viables »**
du point de vue économique et opérationnel

- Introduction du concept de « **flexibilité** » incluant les propriétés de *robustesse*, de *résilience*, d'*adaptabilité* et de *gestion de l'intermittence*
- Mise en situation du logiciel sur les sites de nos partenaires industriels qui couvrent la totalité des **problématiques de flexibilité** identifiées dans le projet

⇨ PROCHAIN JALON … ***RREFLex 1***

- Réelle volonté de ne pas en rester qu'au stade de prototype mais bien de disséminer cet outil
  - Mise en place de la nouvelle architecture logicielle qui s'appuie sur les dernières technologies logicielles : développement avec **Visual Studio 2015 (C# , C++, WPF),** gestionnaire de configuration **Team Foundation Server (TFS**), modélisation **UML ,** base de données avec **Entity Framework**, etc**)**



- Développement des fonctionnalités suivantes :
  - Evaluation des indicateurs économiques et topologiques *(CAPEX, Température et nature des utilités, distance, couplage, etc.)*
  - Mise en place de la boucle de rétroaction et développement des interfaces entrée/sortie associées
  - Prise en compte de données « site » spécifiques
  - Génération automatique de solutions multiples

Notion de FLEXIBILITE

OPERABILITE

Contrôlabilité

Propriété liée à la
***conduite temps réel** du système*

Capacité à pouvoir faire évoluer le système d'un état de fonctionnement x_0 à un autre état x_1 en définissant une loi de commande

⇨ Nécessite une analyse des propriétés dynamiques du système

Les systèmes de commande mis en place sont supposés être capables de maintenir ou d'atteindre les consignes fixées
(au sens de l'« automatique »)

Flexibilité

Propriété liée au
***pilotage court et moyen terme** du système*

Capacité d'un système à fonctionner pour un nombre fini de points de fonctionnement

⇨ **Robustesse *(perturbation d'un point de fonctionnement)* :**
Pour un point de fonctionnement donné défini par des intervalles de tolérance, capacité du système à absorber une perturbation de faible amplitude (« bruit » sur une grandeur physique) sans modification des débits d'utilités et des courants

⇨ **Résilience *(points de fonctionnement correspondant à un mode dégradé)* :**
Pour un point de fonctionnement donné, capacité à absorber une perturbation de fortes amplitudes (hors intervalles de tolérance), à se réorganiser et à continuer à fonctionner de la même manière qu'avant, par action sur les débits ou la topologie du réseau.

⇨ **Adaptabilité *(points de fonctionnement multiples en mode nominal)* :**
En fonctionnement normal, capacité du réseau à fonctionner de manière satisfaisante pour plusieurs points de fonctionnement différents qui peuvent évoluer au cours du temps (fabrication de différentes gammes de produits, changement de campagnes, etc.)

⇨ **Gestion de l'intermittence *:***
En fonctionnement normal, inadéquation temporelle des sources et des puits (fonctionnement calendaire,, procédés batch,…) ⇨ nécessite de recourir à un stockage.