

SESSION 2015

**CAPLP
CONCOURS EXTERNE**

Section : GÉNIE CIVIL

Option : ÉQUIPEMENTS TECHNIQUES - ÉNERGIE

ANALYSE D'UN PROBLÈME TECHNIQUE

Durée : 4 heures

Calculatrice électronique de poche – y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

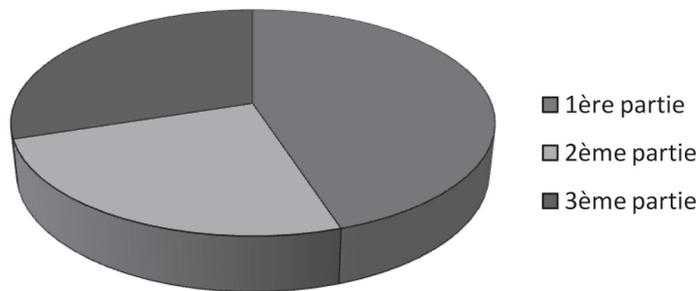
Consignes générales

**Le sujet est composé de 3 parties complètement indépendantes.
Chaque partie devra être traitée sur une copie différente.**

Le sujet se décompose en 4 dossiers :

- présentation de l'étude : pages 3 et 4
- le travail demandé : pages 5 à 12
- les documents techniques (DT) : pages 13 à 16
- les documents réponses (DR) : pages 17 à 21

Il est conseillé de consacrer du temps à chaque partie suivant son importance d'après le graphique suivant :



Les résultats numériques ne seront pris en compte qu'avec leurs unités.

Il est rappelé que la présentation de la copie est un indicateur évalué par le jury.

DOCUMENTS A RENDRE :

- une feuille par partie
- l'ensemble des documents réponses

Remarque : toutes les pages devront être numérotées.

Présentation de l'étude

Les centres aquatiques se développent beaucoup sur le territoire pour répondre aux besoins des familles, des clubs, des associations ou encore des écoles. Ce sont des équipements d'intérêt général puisqu'ils concernent toutes les tranches d'âges et toutes les pratiques (sportives, loisirs ou détente).

Mais ces dispositifs sont très énergivores et doivent donc être très réfléchis aussi bien au niveau de l'architecture bioclimatique, de l'isolation que des systèmes énergétiques mis en place.

L'objectif général est d'avoir une ambiance confortable thermiquement ce qui implique non seulement de maîtriser les flux thermiques mais également les flux hydriques. De plus, il faut assurer une continuité de service au niveau des douches afin de garantir l'hygiène de tous.

On se propose ici d'étudier plus particulièrement l'impact énergétique de la gestion hydrique en fonction des procédés choisis et de l'impact énergétique de la continuité de service au niveau de la distribution d'eau chaude sanitaire.

Présentation du centre aquatique

Le centre est composé de :

- Un bassin sportif de 312 m² (875 m³ maintenus à 28°C toute l'année) ;
- Un bassin d'apprentissage de 156 m² (187 m³ maintenus à 28°C toute l'année) ;
- Une pataugeoire de 50 m² (50 m³ maintenus à 32°C toute l'année) ;
- Un hammam ;
- Deux saunas ;
- Des douches ;
- Des vestiaires ;
- Des locaux de Service/Administration ;
- Des locaux techniques ;
- Un espace de détente ;
- Des aires extérieures.

La fréquentation maximum instantanée (FMI) est de 375 personnes (dont 325 baigneurs).

Les conditions extérieures de base sont :

grandeur	hiver	mi-saison
Température sèche	-7°C	20°C
Humidité absolue	1,8 g _e /kg _{as}	9,5 g _e /kg _{as}

Les conditions extérieures de base été sont sans intérêt car la piscine est ouverte et le traitement d'air arrêté.

Les conditions ambiantes sont :

Locaux	θ_{int} (°C)	ϕ_{int} (%)
Hall bassins	28	65
Sanitaires, hall d'entrée, locaux administratifs	19	NC
Vestiaires, espaces casiers, douches, sanitaires piscine	23	NC
Sauna	85 à 110	<10
Hammam	40 à 50	>90
Zone de détente	21 à 24	NC

Le **traitement d'air** se fait par 2 CTA :

- CTA01 : pour le hall bassins sportif et apprentissage ;
- CTA02 : pour la pataugeoire et l'espace détente (**non étudiée**).

On ne s'occupera pas des autres locaux.

La **production de chaleur** se fait par 2 chaudières :

- Une chaudière gaz à haut rendement de 500 kW ;
- Une chaudière gaz à condensation de 650 kW avec brûleur modulant.

La **production d'ECS** se fait en semi-accumulation par le biais d'un échangeur à plaques de 400 kW et d'un stockage de 6000 L.

Travail demandé

Partie I – Déshumidification

Toutes les questions peuvent être traitées indépendamment.

Dans une piscine, la déshumidification engendre une consommation d'énergie importante. On se propose ici d'étudier 2 solutions afin de faire le choix le moins énergivore :

- une solution par refroidissement ;
- une solution en tout air neuf.

Question 1 – Déshumidification par refroidissement

Pour ce type de configuration, la déshumidification se fera par une centrale de traitement d'air composée entre autre d'une batterie froide et d'une batterie chaude. La CTA fonctionnera en **tout air repris** et fournira un air aux conditions ambiantes.

Caractéristiques de la machine frigorifique alimentant la batterie froide :

- Fluide frigorigène : R410a ;
- $\theta_{\text{cond}} = 40^{\circ}\text{C}$;
- BP = 9 bar relatif ;
- Surchauffe : 5°C ; Surchauffe ligne d'aspiration : 2°C ;
- Sous-refroidissement : 5°C ;
- Rendement indiqué $\eta_i = 0,86$.

- a) Déterminez la température d'évaporation, la HP, les enthalpies d'entrée puis de sortie (isentropique et réelle) du compresseur.
Tracez le cycle complet sur le diagramme joint (cf. DR01 p17/21).
Déterminez le coefficient d'efficacité frigorifique.
- b) Considérant la température de surface de la batterie froide à 8°C , l'efficacité de la batterie à 80%, déterminez les caractéristiques de l'air en sortie de batterie froide (cf. DR02 p18/21).
Le renouvellement d'air étant traité à part et assurant de ce fait une partie de la déshumidification, on considérera que les charges hydriques à traiter par la batterie froide sont de $190 \text{ kg}_w/\text{h}$ dans les conditions les plus défavorables. Déduisez-en le débit d'air devant circuler dans la CTA et les puissances engendrées (refroidissement et chauffage) afin de souffler l'air à 28°C .
- c) Afin d'optimiser les consommations d'énergie, on souhaite récupérer l'énergie du condenseur pour chauffer l'eau des bassins. Déterminez la puissance calorifique récupérable au condenseur en considérant que la puissance frigorifique fournie est de 250 kW et que les rendements des échangeurs sont de 100%.

d) Sachant que :

- le besoin pour le réchauffage des bassins est de 440 kW ;
- le condenseur fournit 295 kW ;
- le rendement (mécanique et électrique) du compresseur est de $\eta_{\text{comp}}=65\%$;
- la récupération d'énergie au niveau du condenseur est opérationnelle.

Indiquez pour les conditions extérieures de -7°C / $1,8 \text{ g}_e/\text{kg}_{\text{as}}$ la puissance réellement consommée pour déshumidifier et pour réchauffer les bassins.

Question 2 – Déshumidification en tout air neuf

a) Évaluez le taux d'évaporation du bassin sportif à partir de la formule suivante :

$$q_{m,\text{évap}} = 1,35 \cdot 10^{-4} \cdot (p_{v_s,\text{eau}} - p_{v,\text{air}})$$

Sachant que :

$$\varphi = \frac{p_{v,\text{air}}}{p_{v_s,\text{air}}} \times 100 \text{ en } \%$$

$$p_{v_s} = 101325 \times 10^{\left(17,443 - \frac{2795}{T} - 3,868 \cdot \log T\right)}$$

- avec :
- $q_{m,\text{évap}}$: débit d'eau évaporée par m^2 de plan d'eau ($\text{kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$)
 - $p_{v_s,\text{eau}}$: pression de vapeur saturante prise à la température de l'eau (Pa).
 - $p_{v_s,\text{air}}$: pression de vapeur saturante prise à la température de l'air (Pa).
 - $p_{v,\text{air}}$: pression partielle de vapeur d'eau dans l'air ambiant (Pa).
 - T : la température en K.

b) En réalité, pour l'ensemble du centre aquatique, le débit d'évaporation des bassins est de $100 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{h}$.

A ceci s'ajoutent les apports en humidité dus aux occupants estimés à $75 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{h}$, mais aussi ceux dus à l'évaporation sur les baigneurs et les plages soit $53 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{h}$.

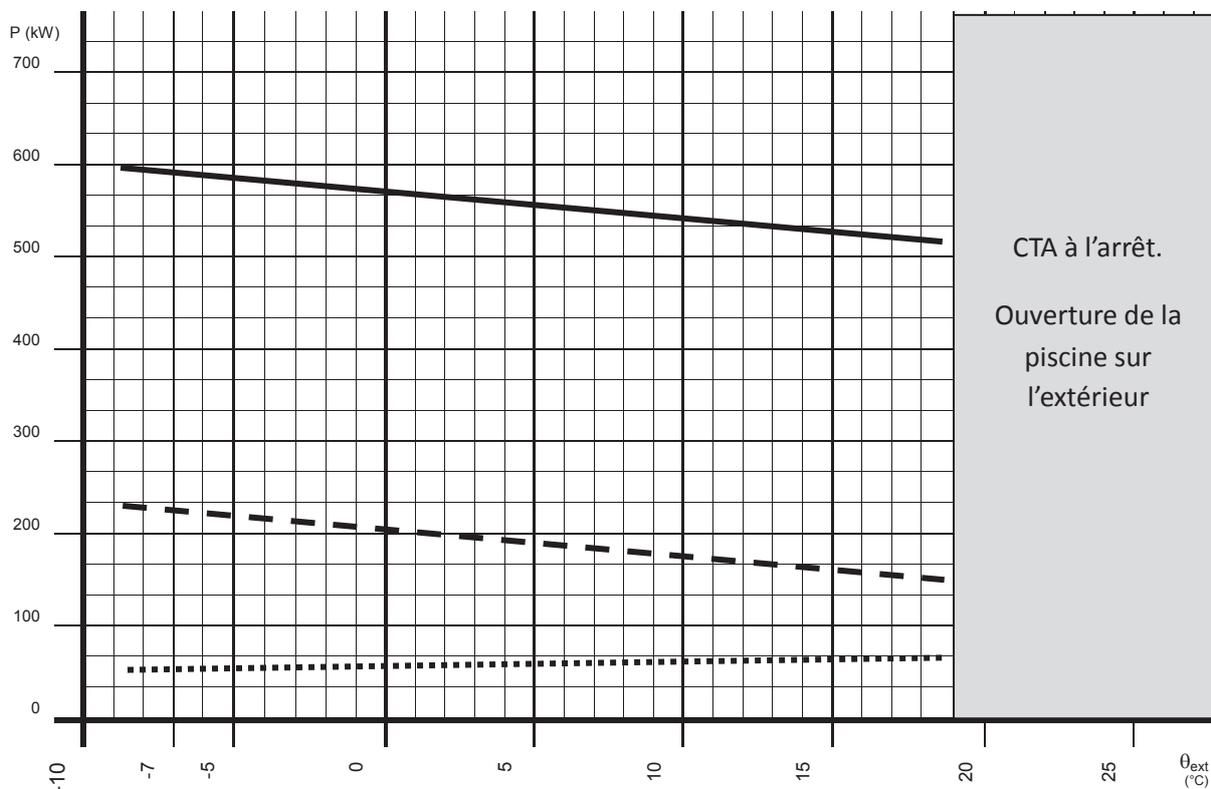
Pour les conditions hiver, connaissant les charges hydriques, et les humidités absolues intérieures et extérieures (cf. DR02 p18/21), déduisez-en le débit massique d'air sec qu'il faudra apporter pour compenser cette humidité.

c) Considérant que le débit volumique d'air à -7°C / $1,8 \text{ g}_e/\text{kg}_{\text{as}}$ est de $14000 \text{ m}^3/\text{h}$, déterminez la puissance nécessaire pour le chauffage de cet air jusqu'aux conditions intérieures.

d) L'évaporation en mi-saison étant identique, on obtient un débit massique d'air neuf à apporter pour déshumidifier de $38000 \text{ kg}_{\text{as}}/\text{h}$. Justifiez pourquoi il faut plus d'air en mi-saison qu'en plein hiver.

Question 3 – Comparaison énergétique

Les études approfondies de toutes les configurations proposées permettent d'obtenir les puissances thermiques liées au chauffage de l'eau du bassin et de l'air neuf sur le graphique suivant en fonction des conditions extérieures :



- Puissance thermique solution déshumidification par renouvellement d'air
- - - Puissance thermique solution déshumidification par refroidissement
- Puissance électrique solution déshumidification par refroidissement

Après avoir réalisé une analyse du graphique, justifiez quelle est la solution la plus économique et quelle est la solution la plus écologique.

Partie II – Etude de la production ECS

Toutes les questions peuvent être traitées indépendamment.

Pour toutes les questions suivantes, prendre une masse volumique de l'eau de **986 kg/m³** et une chaleur massique de **4186 J/(kg.°C)**

Question 1 – Analyse de fonctionnement de la production d'ECS

- a) Indiquez sur le schéma de principe de la production d'Eau Chaude Sanitaire, document réponse DR03 (p19/21), quelles sont les vannes ouvertes et fermées en fonctionnement normal de cette installation.
- Les vannes normalement fermées seront noircies accompagnées d'un « NF » ;
 - Les vannes normalement ouvertes seront accompagnées d'un « NO ».
- b) Le document réponse DR04 (p20/21) représente 3 configurations de soutirage d'ECS. Pour chacune de ces configurations, on vous demande d'indiquer la circulation du fluide dans l'échangeur et les volumes de stockage et d'expliquer de façon concise le fonctionnement pour chaque configuration.

Question 2 – Dimensionnement de l'échangeur ECS

Echangeur prévu :

- 1 échangeur de 400 kW pour la production d'ECS ;
- Plaques Inox 316L ;
- On considère l'échangeur à contre courants ;
- On considère un coefficient de transmission (échangeur neuf) ; caractérisant l'échange de $3500 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

Circuit primaire échangeur :

- Débit de fluide : $17,2 \text{ m}^3/\text{h}$;
- Régime d'eau : 80/60 °C.

Circuit secondaire échangeur :

- Débit de fluide : $7,0 \text{ m}^3/\text{h}$;
- Régime d'eau : 10/60 °C.

A partir des données ci-dessus, déterminez la surface de cet échangeur.

Question 3 – Estimation des performances de l'échangeur ECS avec encrassement

Echangeur prévu :

- Surface d'échange : $3,0 \text{ m}^2$;
- Encrassement : $0,000012 \text{ m}^2.\text{KW}$

Circuit primaire échangeur :

- Débit de fluide : $17,2 \text{ m}^3/\text{h}$;
- Régime d'eau primaire : température d'entrée 80 °C.

Circuit secondaire échangeur :

- Débit de fluide : $7,0 \text{ m}^3/\text{h}$;
- Régime d'eau secondaire : température d'entrée 10°C.

- a) Quelles vont être les conséquences directes de cet encrassement sur les performances de la production d'ECS ?
- b) Calculez alors le coefficient de transmission caractérisant l'échangeur encrassé.
- c) Déterminez alors l'efficacité de cet échangeur ainsi encrassé (cf DR05 p21/21).
- d) Considérant une efficacité de 65%, déterminez enfin la température de sortie de l'eau chaude sanitaire dans un tel cas de figure. Que pouvez-vous en conclure ?

Partie III – Etude du réseau de bouclage ECS du bloc « douche »

Toutes les questions peuvent être traitées indépendamment.

Hypothèses et bases de calcul Plomberie

Le schéma simplifié de cette boucle d'eau chaude sanitaire et de son bouclage est disponible sur le document technique DT01 page 13/21.

Le circuit de distribution du « bloc douche » est subdivisé en 4 boucles identiques comprenant chacune 8 douches qui pourront fonctionner de manière simultanée. Le débit d'ECS par douche à prendre en compte est de **0,125 L/s**.

Eau froide et chaude

Le circuit de distribution de l'ECS sera :

- à 55°C au départ de la chaufferie ;
- à 38°C sur les robinetteries des sanitaires (douches, lavabos,...) ;
- à 60°C par dérogation pour un traitement de 5 min par jour par action manuelle ;
- d'une longueur de 70 m entre la production ECS et le point de puisage le plus éloigné ;
- d'un diamètre constant sur la ceinture principale ;
- la température minimum définie selon la réglementation doit être de 50°C en tout point du système de distribution, à l'exception des tubes finaux d'alimentation des points de puisage ;
- en PVC pression HTA pour les distributions principales et bouclage (cf. DT02 page 14/21), en cuivre pour les distributions terminales, le tout calorifugé par manchon autocollant M1, d'épaisseur 19 mm, et de conductivité thermique $\lambda = 0,038 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$.

L'installation sera conforme au DTU 60.11 dont des extraits sont donnés dans le document technique DT03 pages 15 et 16 /21.

Vitesses maximales dans les réseaux EF-EC et bouclage ECS

- Distributions intérieures et boucles : 0,90 m/s,
- Tuyauteries en ceintures principales : 2,00 m/s.

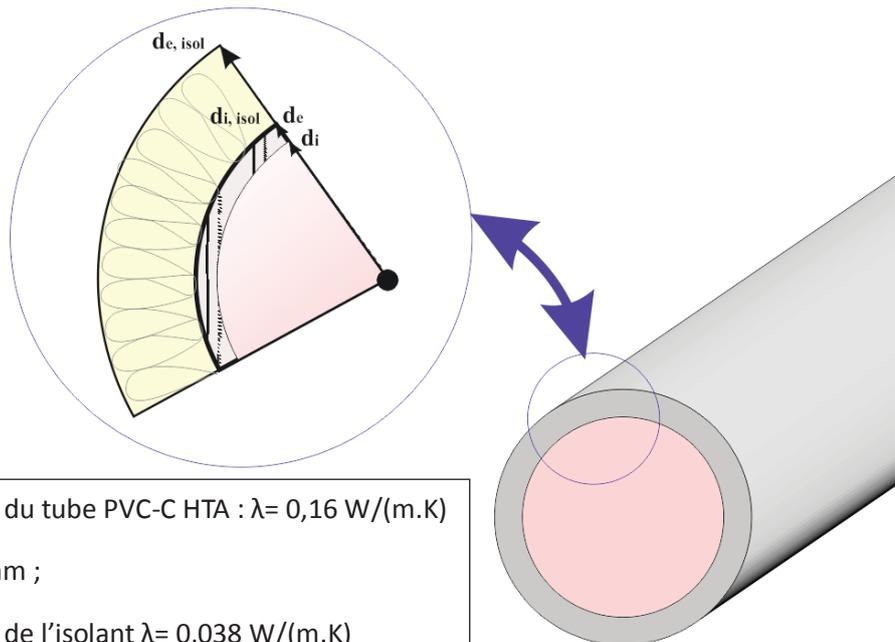
Question 1 – Intérêts du bouclage sanitaire

- a) Rappelez l'(les) intérêt(s) d'un bouclage Eau Chaude Sanitaire.
- b) Quel est l'intérêt de mitiger l'eau une première fois en sortie de la production d'eau chaude et une seconde fois en entrée de chaque boucle « douche ».

Question 2 – Estimation des pertes thermiques de la boucle n°3 et détermination du débit de bouclage de cette boucle « douche »

- **Longueur de la canalisation « aller de la boucle »** : 8 m
- Caractéristiques du tube PVC-C Pression HTA-DT02 page 14/21
- **Diamètre de la canalisation de bouclage ECS, « retour boucle »** : Diamètre minimal réglementaire \Rightarrow cf. prescriptions DTU 60.11 document technique DT03 pages 15-16/21.
- **Température ambiante** : 23°C
- **Température moyenne de l'eau dans la boucle « aller »** : 53°C

- a) Déterminez le débit d'eau chaude sanitaire dans la conduite « aller » d'une boucle douche de 8 douches puis, déterminez le diamètre approprié du tube PVC-C HTA.
- b) On considère, pour la suite de cette étude que le diamètre de la conduite aller d'une boucle est 50×5,6mm.
A partir de la méthode de calcul fournie dans l'extrait du DTU 60.11, DT03 pages 15-16/21 déterminez les pertes thermiques de cette canalisation « aller » avec l'ambiance à la température θ_a .



c) On considère maintenant, que les pertes thermiques totales de cette boucle « aller + retour » sont estimées à 110 W. L'écart de température d'eau chaude sanitaire acceptable au niveau de cette boucle est considéré à 1°C.

Déterminez dans ces conditions, le débit de bouclage de cette boucle.

d) Par rapport à l'extrait de réglementation fournie, que pouvez-vous en conclure sur la vitesse de circulation du fluide ainsi que sur le débit de bouclage de cette boucle ?

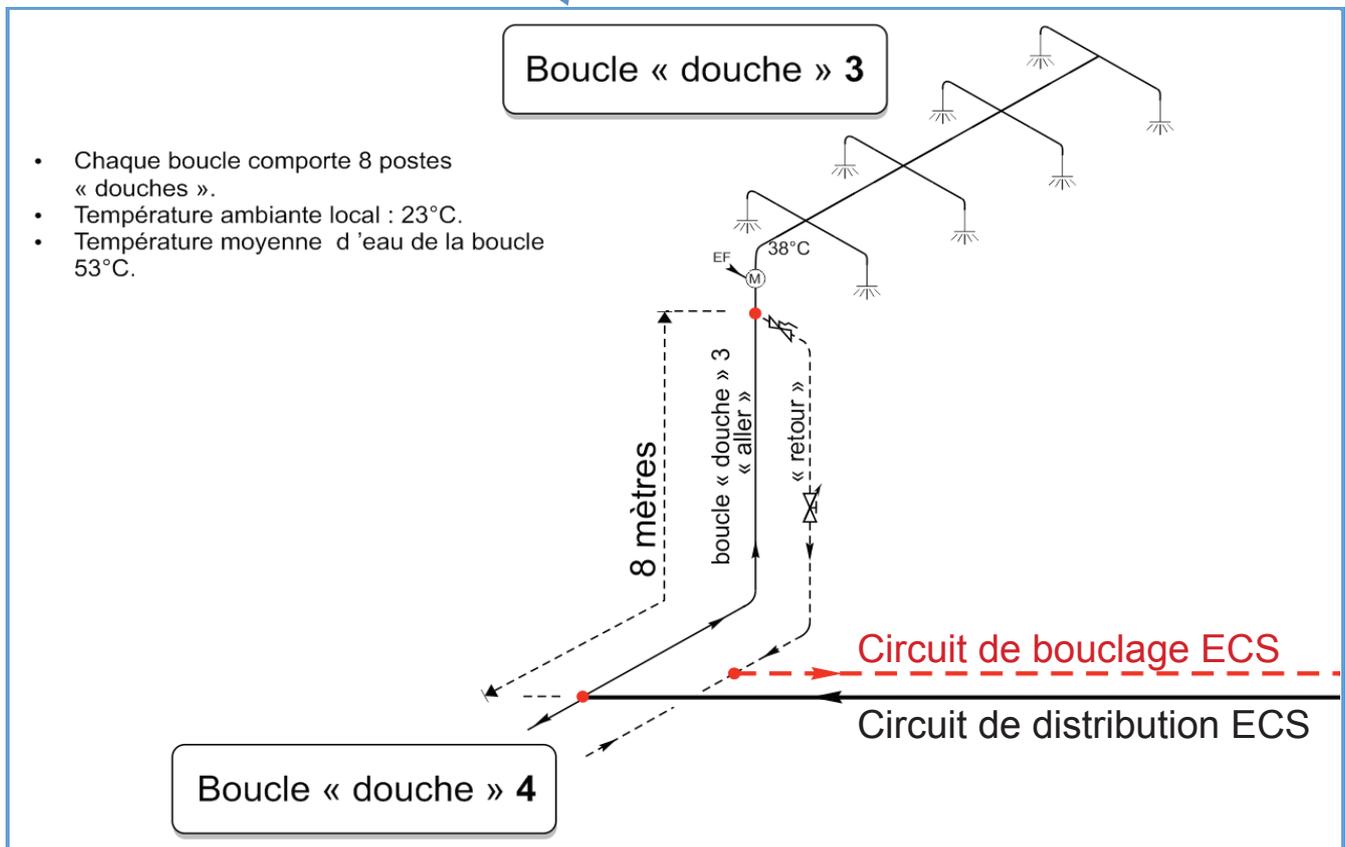
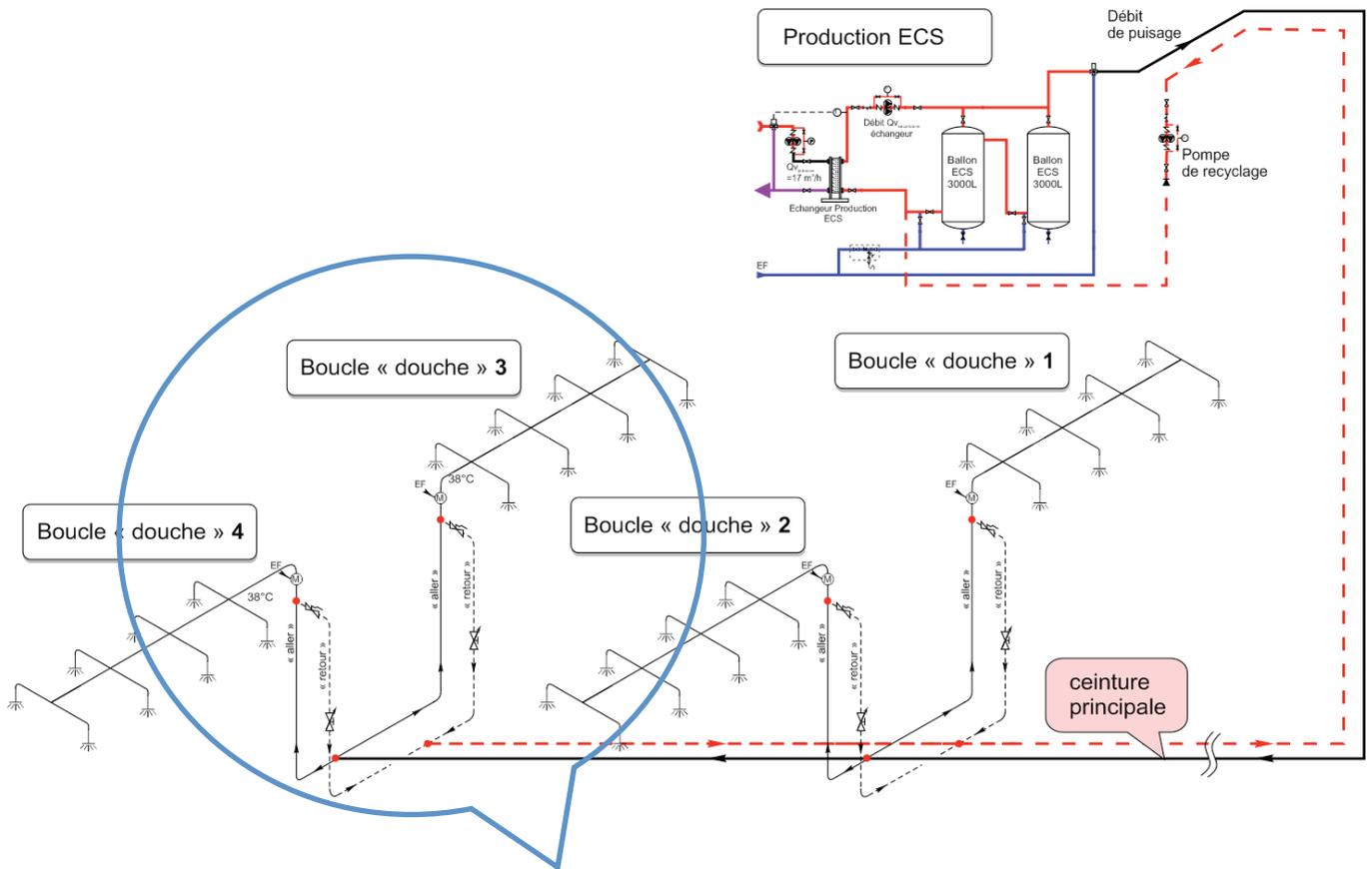
Déterminez alors le débit total de bouclage de ce circuit « bloc douche ».

e) Sachant que :

- la puissance moyenne pour satisfaire les besoins ECS est de 440 kW et le nombre d'heures de soutirage quotidien est de 10 heures ;
- on considèrera un fonctionnement annuel permanent de l'installation de production ECS de cette structure ;
- la puissance cumulée électrique des circulateurs primaire et secondaire échangeur ECS est de 250 W ;
- la consommation d'entretien (maintien en température des 2 volumes) du volume d'eau chaude sanitaire est estimée à 500 W ;
- la puissance du circulateur de bouclage ECS est de 150 W ;
- les pertes thermiques liées au bouclage ECS sont 2000 W,

Déterminez le surcroît de consommation énergétique (exprimé en %) dû au bouclage ECS par rapport à la consommation énergétique globale de cette installation.

DT01 – Schématisation simplifiée Circuit distribution et bouclage ECS



Diamètres Commerciaux Tube PVC-C HTA

Tubes	HTA - RAL8019
DN 16	16 x 1,8
DN 20	20 x 2,3
DN 25	25 x 2,8
DN 32	32 x 3,6
DN 40	40 x 4,5
DN 50	50 x 5,6
DN 63	63 x 7,1

1. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

Caractéristiques	Normes	Unités	Valeurs
Aspect physique	NF T 54-029/54-003 - ISO 7686	—	—
Classement Feu		—	M1
Masse volumique	NF T 54-022 - ISO 1183/3514	g/cm ³	1,45 à 1,65
Coefficient de dilatation linéaire	ASTM D 696-70	mm/m.°C	0,065
Capacité thermique massive		Cal./g°C	0,29
Conductibilité thermique λ	ASTM C 177-76	W/m.°K	0,16
Absorption d'eau (24 h à 100°C) (tubes) (raccords)	NF T 54.023 - ISO 8361	g/m ²	≤ 40
	NF T 54.033/54.029 - ISO 2508/8361	g/m ²	≤ 40
Retrait à 150°C	NF T 54.021 - ISO 2505	%	≤ 4%

■ DOMAINES D'EMPLOI DU BÂTIMENT :

Visés par l'avis technique délivré par le CSTB, en PN 25 et PN 16

- Classe ECFS : Eau chaude et froide sanitaire.

Installations parcourues par l'eau dont la température est ≤ 80°C, mais pouvant subir des pointes accidentelles à 100°C.

Rappel : l'arrêté du 23 Juin 1978 limite la température à 60°C au point de puisage.

- Classe 2 : Chauffage basse température (incluant la climatisation réversible).

Installations (à l'exception de planchers chauffants) dont la température est normalement ≤ 50°C et pouvant subir des pointes accidentelles à 65°C.

...

4 Règles générales

...

4.2 Règles générales de dimensionnement

La conception et le dimensionnement du réseau de bouclage doivent prendre en compte un certain nombre de contraintes :

...

Pour limiter les risques de développement du biofilm et l'accumulation de dépôts, une vitesse minimale de fluide de 0,20 m/s est nécessaire dans les retours de boucle. D'autre part, dans ces mêmes retours, une vitesse maximale de 0,5 m/s est conseillée ;

Pour limiter le risque d'obstruction par entartrage, un diamètre minimal est nécessaire. Selon les matériaux les canalisations doivent avoir un diamètre supérieur ou égal à :

- Pour les tubes en acier galvanisé : DN 15 - 16,7/21,3 mm ;
- Pour les tubes en cuivre : 14 × 1 mm;
- Pour les tubes en PVC-C : DN 16 - 12,4/16 mm ;
- Pour les tubes en PEX ou PB : DN 16 - 16 × 1,5 mm ;
- Pour les autres matériaux : un diamètre intérieur minimal de 12 mm.

5 Méthode de calcul

...

Formules utilisées

Coefficient de transfert thermique linéaire d'une canalisation isolée UI en W/(m.°C)

$$UI = \frac{2\pi}{\frac{1}{\lambda_{\text{tube}}} \cdot \ln\left(\frac{d_e}{d_i}\right) + \frac{1}{\lambda_{\text{isol}}} \cdot \ln\left(\frac{d_{e,\text{isol}}}{d_{i,\text{isol}}}\right) + \frac{2}{h_e \cdot d_{e,\text{isol}}}} \quad \dots (1)$$

Par défaut h_e vaut 10 W/(m²·K).

Perte thermique de la canalisation Q en W

$$Q = UI \cdot L \cdot (\theta_e - \theta_a) \quad \dots (2)$$

Chute de température dans la canalisation $\Delta\theta_e$ en °C

$$\Delta\theta_e = \frac{Q}{q \cdot \rho \cdot c} \quad \dots (3)$$

Dimensionnement

La méthode décrite ci-après est un exemple de déroulement de calcul.

...

Débits des boucles

...

On considère également que le diamètre de la canalisation de retour est le diamètre minimum indiqué au 4.2.

Les pertes thermiques des retours de boucles sont calculées à l'aide des équations (1) et (2).

...

Diamètres de retour des boucles

La vitesse de circulation dans les retours de boucle est calculée à partir du débit de chaque boucle.

Si la vitesse dans le retour de la boucle est comprise entre 0,2 et 0,5 m/s, l'hypothèse est validée.

Si cette vitesse est inférieure à 0,2 m/s, on calcule le débit de la boucle en considérant que la vitesse dans le retour est de 0,2 m/s.

Si cette vitesse est supérieure à 0,5 m/s, on refait le calcul en prenant un diamètre supérieur à l'hypothèse de départ.

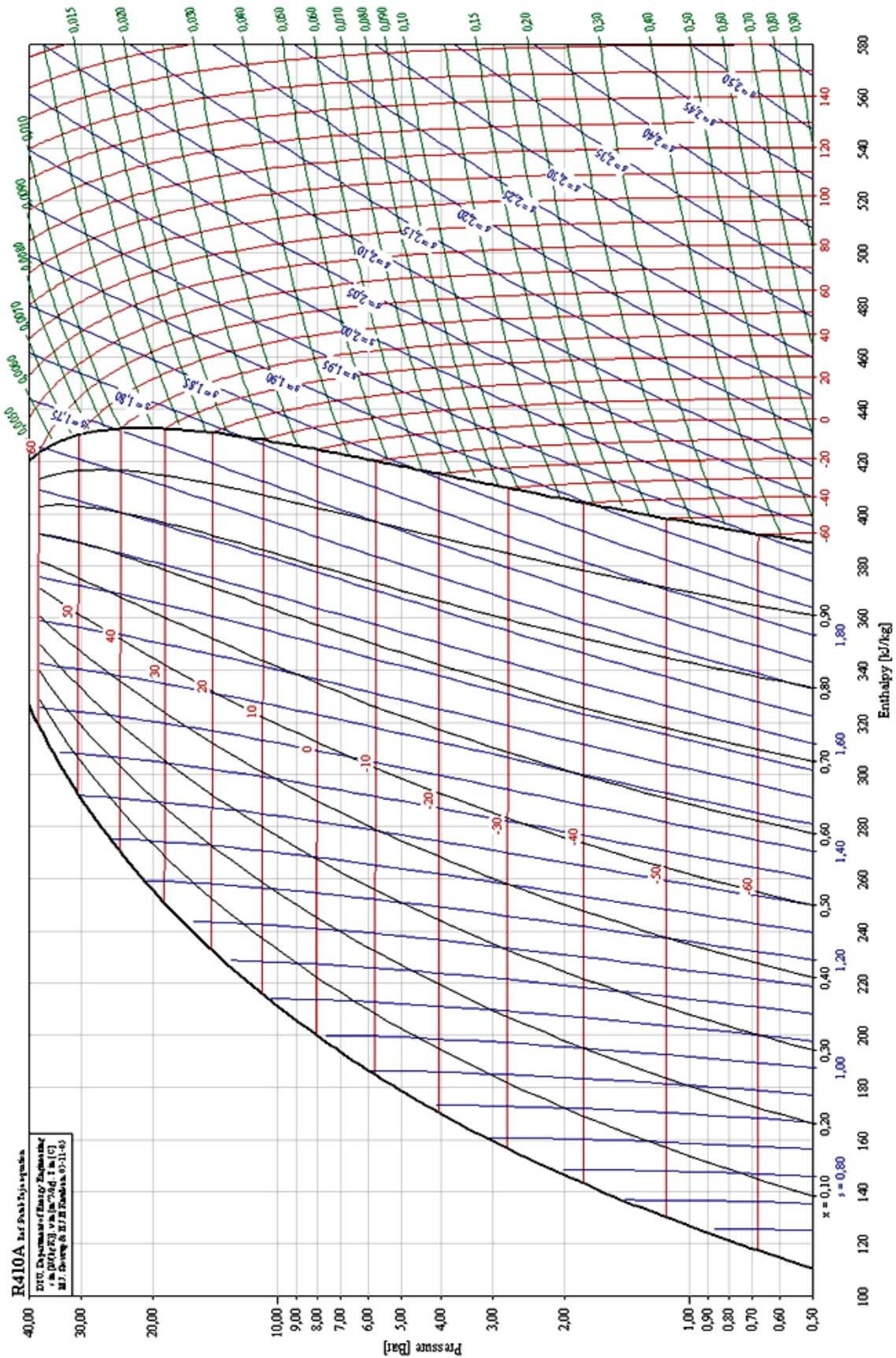
Si le calcul conduit à un diamètre de retour supérieur au diamètre du tronçon « aller », revoir la conception des boucles.

Débit total de bouclage

Le débit total de bouclage q_{total} est égal à la somme du débit de chaque boucle

..../....

DR01 – Diagramme enthalpique du R410a

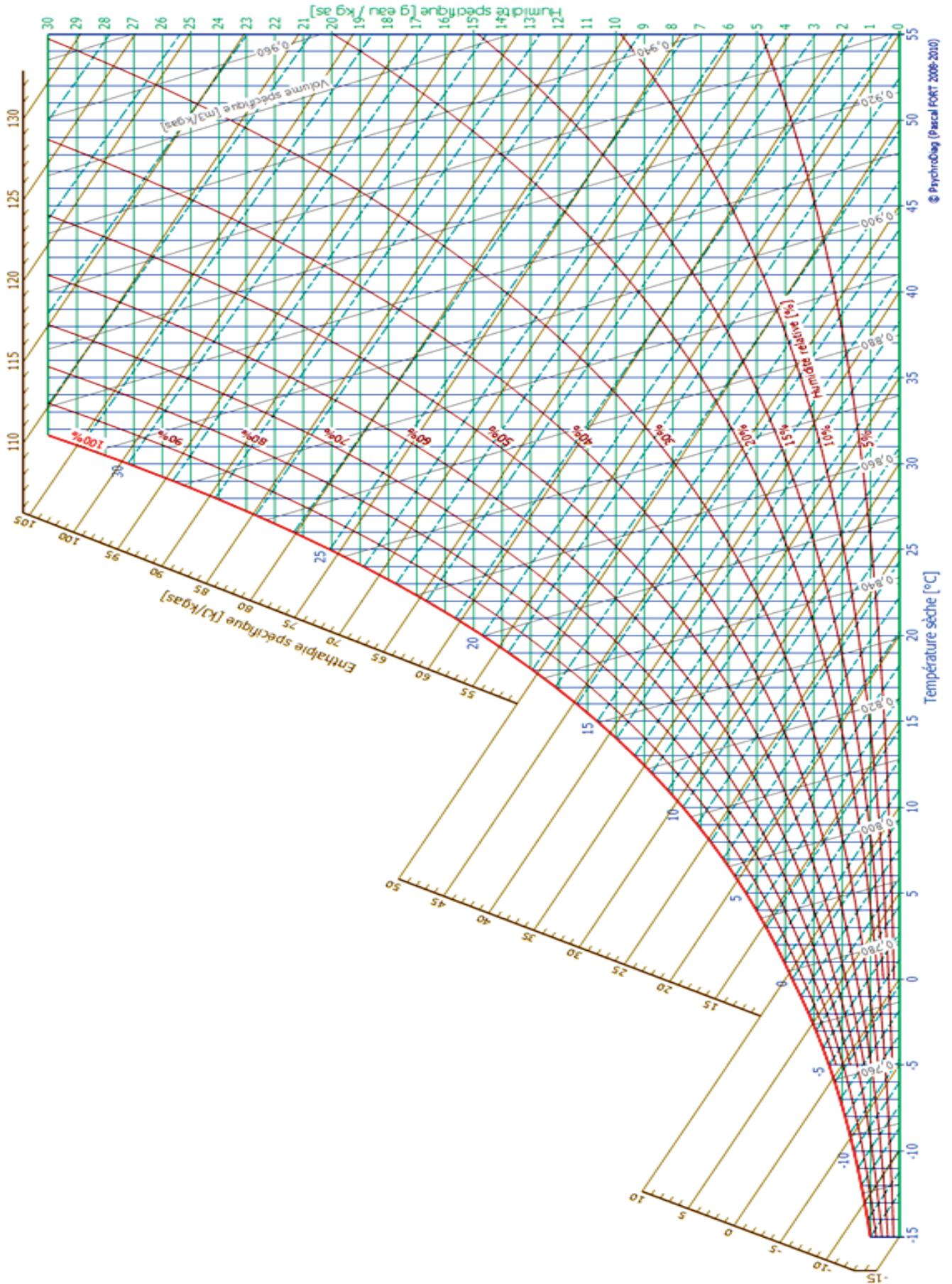


DR01 p...../.....

DR02 – Diagramme de l'air humide

Pression atmosphérique 101325 Pa Altitude 0 m

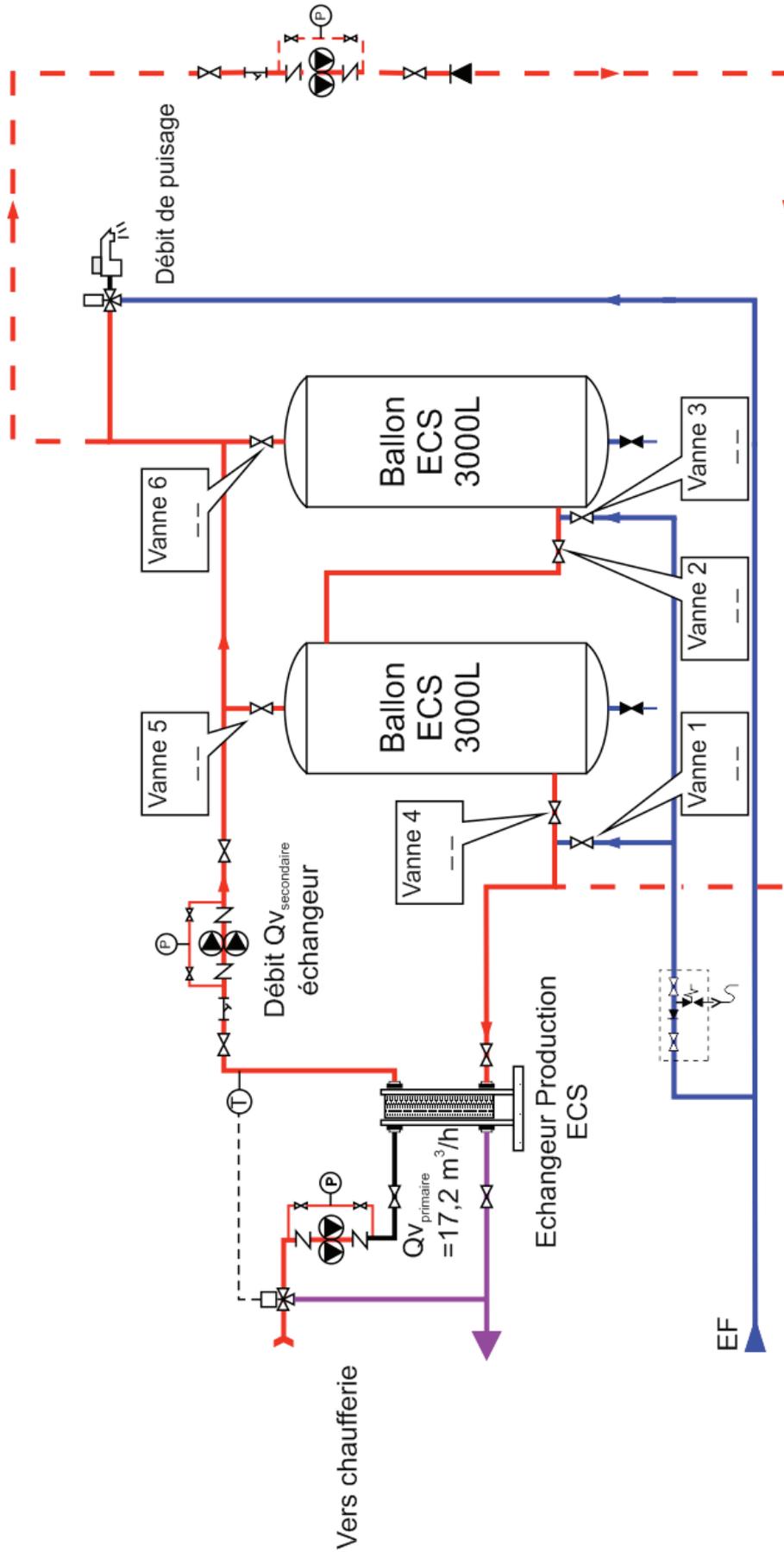
DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE



© PsychroDiag (Pascal FOIRET 2008-2010)

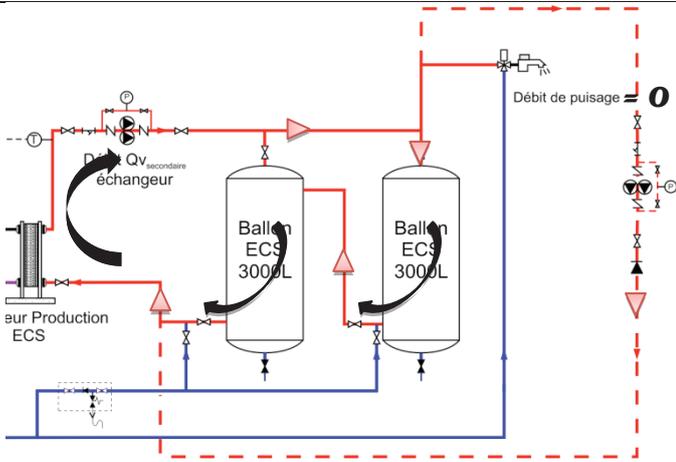
DR02 p...../.....

DR03 – Schéma de la production d'eau chaude sanitaire



DR04 – Analyse de fonctionnement de la production d'eau chaude sanitaire

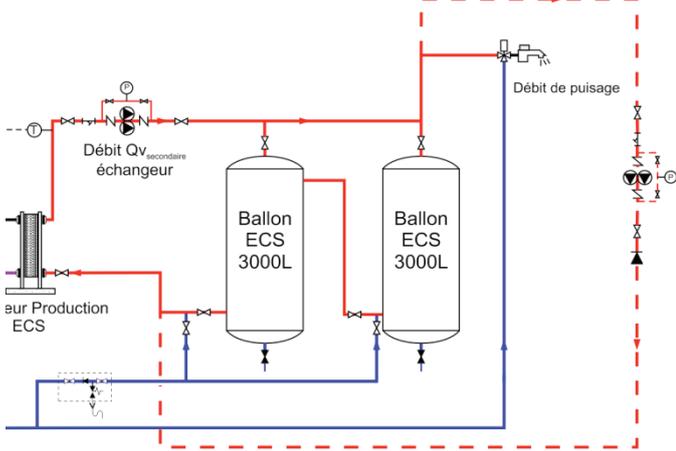
Configuration n°1 : Le débit de puisage est nul



Explications : *EXEMPLE*

Le débit de puisage est nul, le débit ECS circulant au secondaire de l'échangeur permet la mise en température et le maintien en température du volume de stockage n°1 et 2, l'ECS transite ainsi du premier ballon vers le second ballon et est donc maintenue en température. La pompe de bouclage fait circuler l'eau via le circuit de distribution et de bouclage ECS.

Configuration n°2 : Le débit de puisage est inférieur au débit circulant au secondaire de l'échangeur



Explications :

.....

.....

.....

.....

.....

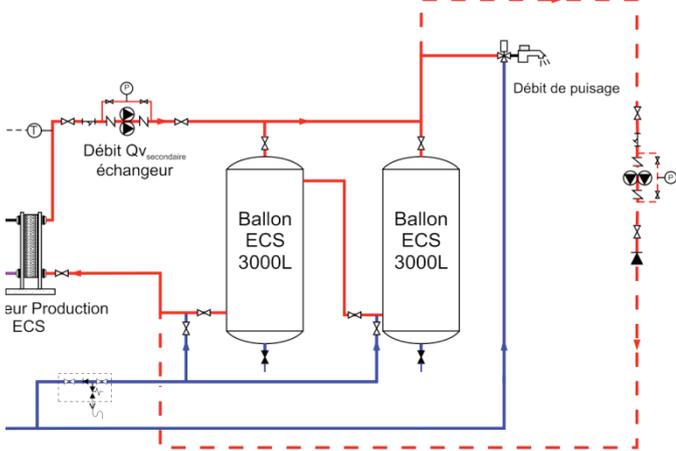
.....

.....

.....

.....

Configuration n°3 : Le débit de puisage est supérieur au débit circulant au secondaire de l'échangeur



Explications :

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

DR05 – Dimensionnement échangeur

Détermination des échangeurs

- **NUT** : (Nombre d'Unité Transfert)

$$\text{NUT} = \frac{K \times S}{(q_m \cdot C)_{\min}}$$

- $R = \frac{(q_m \cdot C)_{\min}}{(q_m \cdot C)_{\max}}$

- Efficacité de l'échangeur

Efficacité

