

Repères sur le séchage du foin en grange

Partie 2. Traitement de l'air

Pierre Aeby
Collaborateur scientifique
Grangeneuve, Institut agricole de l'Etat de Fribourg
Route de Grangeneuve 31
CH-1725 Posieux
pierre.aeby@fr.ch



Sans indications particulières, photos de l'auteur
Version automne 2024

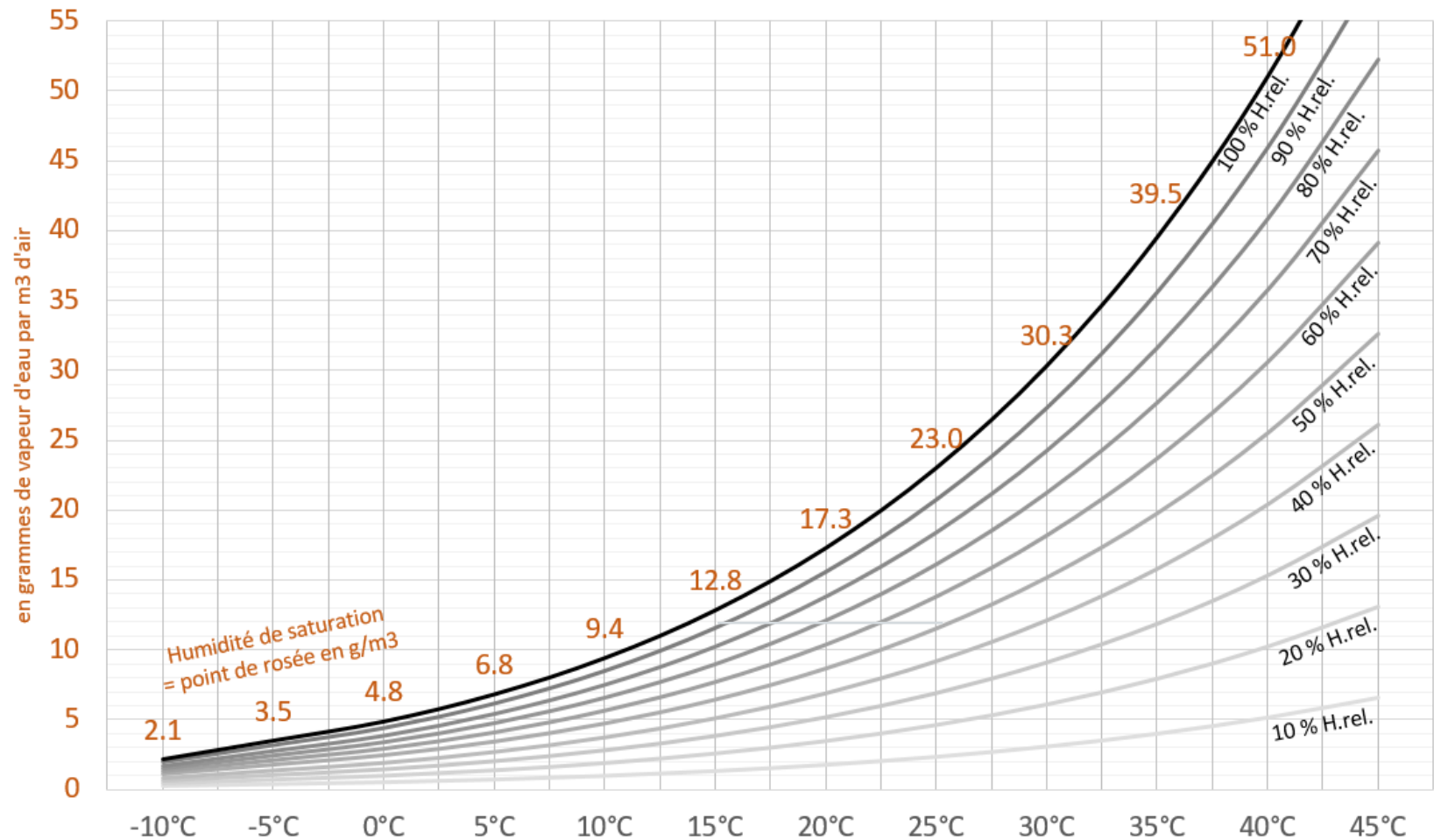
Deux grandes options pour traiter l'air

- Echauffement de l'air
 - Récupération de chaleur sous toiture ou sous photovoltaïques
 - Chaudières (bois / mazout / gaz)
 - Eau chaude (méthanisation / chauffage à distance)
- > Déshumidification de l'air



<https://betterorganix.com/blog/what-is-how-to-calculate-vapour-pressure-deficit#:~:text=To%20Get%20VPD%2C%20we%20need,A nd%20OILA%2C%20you%20have%20VPD.>

Capacité de l'air à absorber l'humidité



Récupérer air sous toiture = énergie gratuite

- Puissance calculée : 300 à 380 W par m² de récupérateur (Source = calcul sur 23 projets Fribourgeois, 2022)
= puissance ~200 kW pour récupérateur 600 m²
- Gain +5 à +15°C
- Photovoltaïque >= Tôle > Fibrociment >> Tuile
- Investissements de 15'000 à 50'000 CHF



- Voir capsule 6, cours en ligne Grangeneuve 2021
<https://www.grangeneuve-conseil.ch/index.php/fr/2-uncategorised/438-capsules-formation-continue-en-agriculture>

Planifier une grande surface de toiture

- Surface capteur 3 à 5 x surface du séchoir
- Standard = aspiration en pignons, échauffement entre pannes-chevrons et collecte dans canal vers ventilateur
- Toiture non isolée
- Capteur encore pertinent sur un pan Nord :

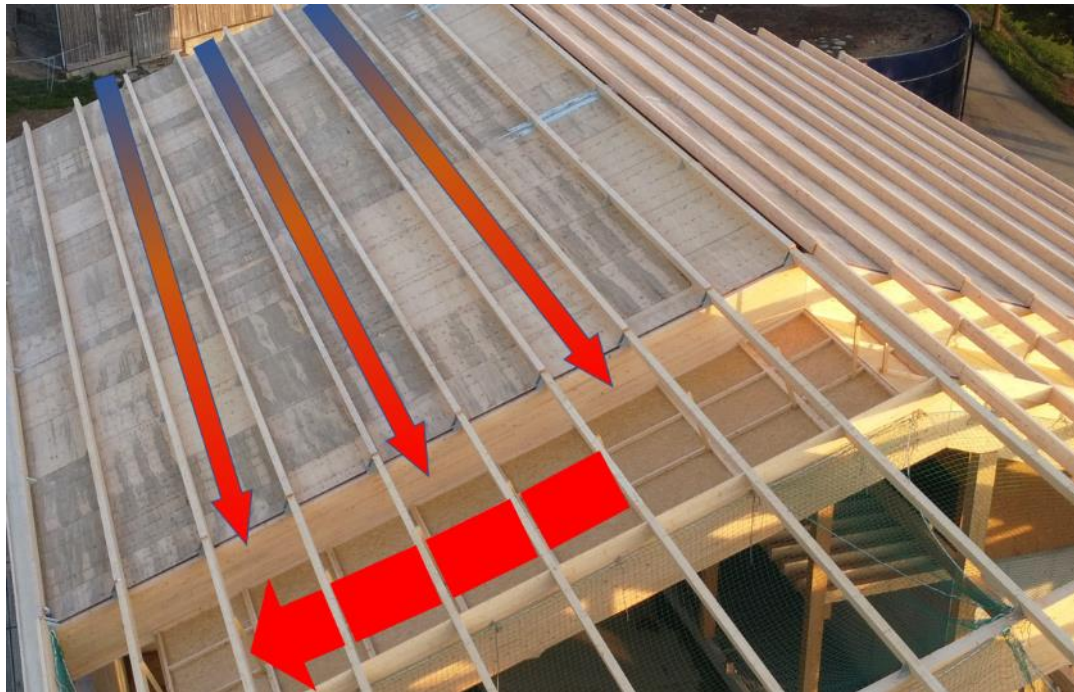
**Apport relatif de l'ensoleillement direct
par rapport à une exposition idéale,
plein sud avec une inclinaison de 20°C**

Exposition (orientation par rapport au sud)	Inclinaison du toit				
	10°	20°	30°	40°	50°
	%	%	%	%	%
0° sud	98	100	99	96	89
30	97	99	98	94	88
60	95	94	92	89	83
90 ouest/est	91	88	84	79	72
120	88	81	73	65	57
150	86	76	65	52	39
180 nord	85	74	62	47	32



Optimiser la longueur d'échauffement

- Grande longueur = gros échauffement
- Mais augmentation du frottement
- Perte de pression max à planifier = 1.0 hPa
→ 30 m longueur



Respecter le débit d'air du ventilateur

- 60'000 m³ d'air / heure pour séchoir de 150 m²
- Vitesse de l'air de 2 à 6m / sec
- Hauteur des pannes déterminante pour assurer le débit du ventilateur



Récupération de chaleur sous toiture



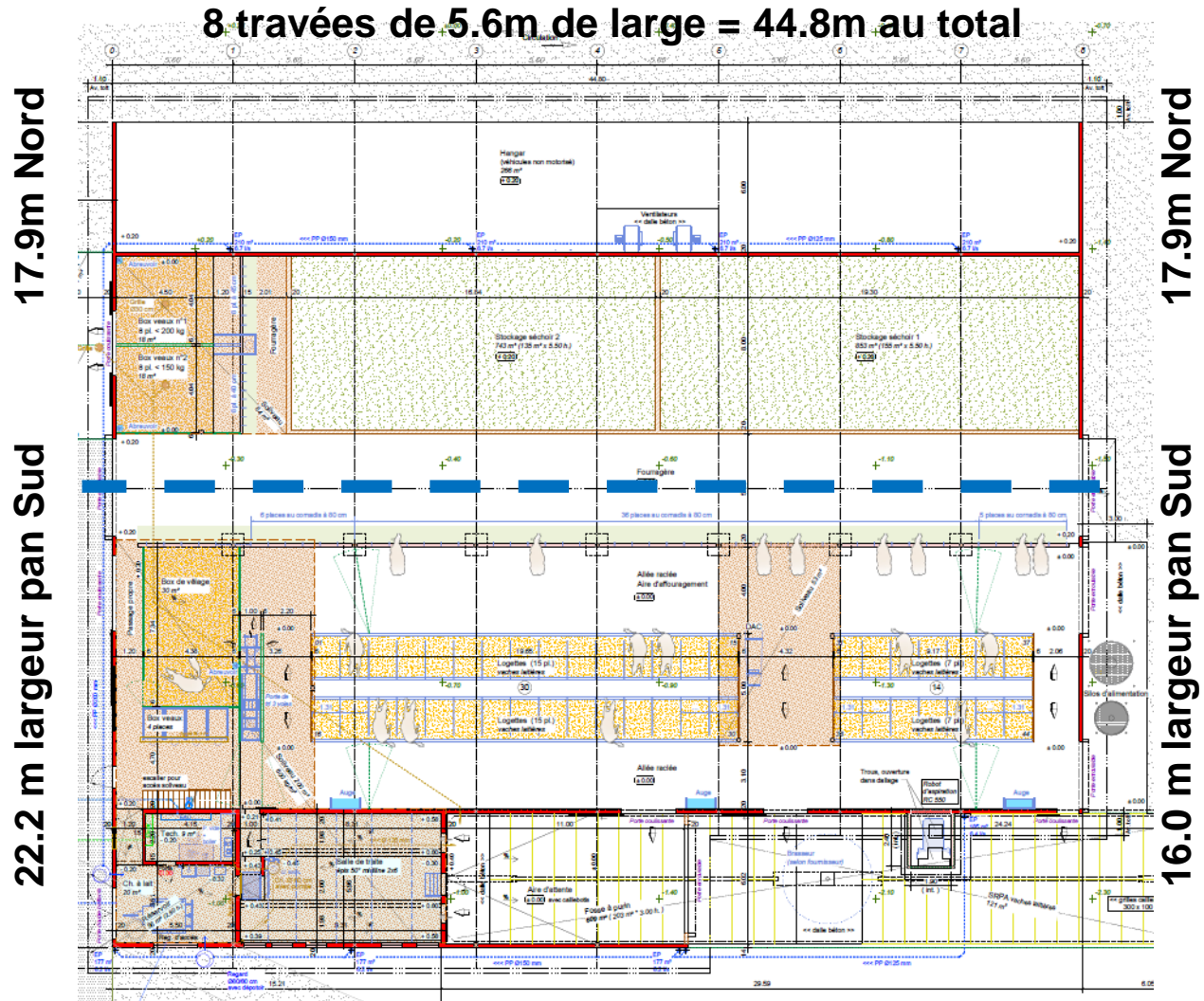
Récupération de chaleur sous toiture



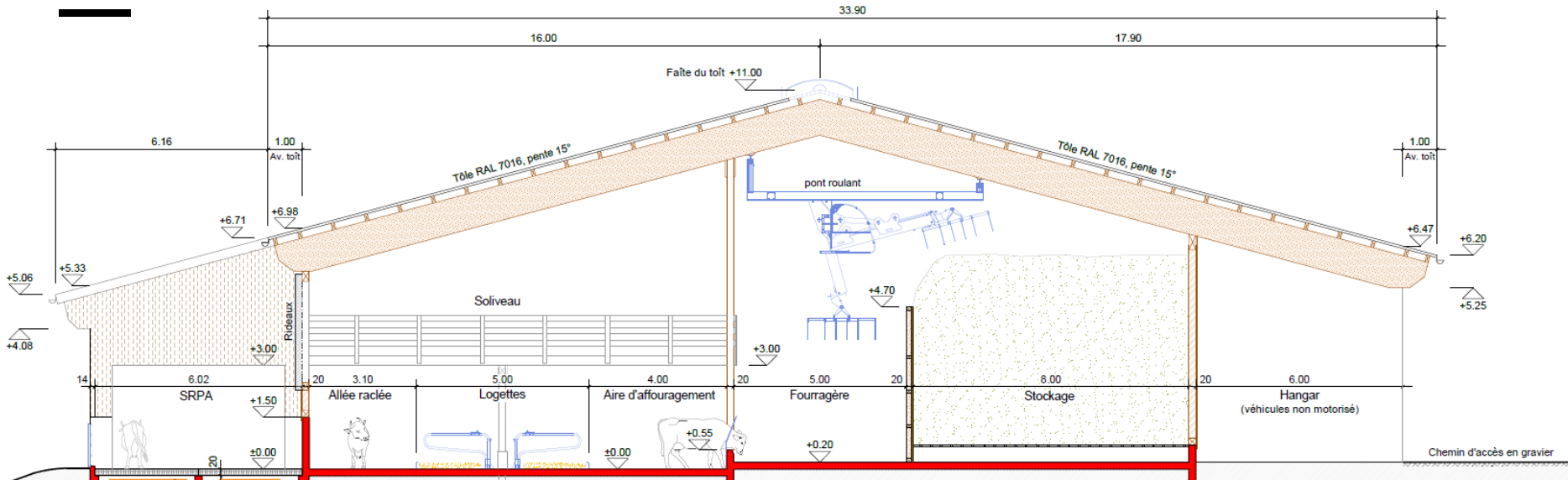
Respecter le débit d'air, avec des ouvertures suffisamment larges



Exemple de planification

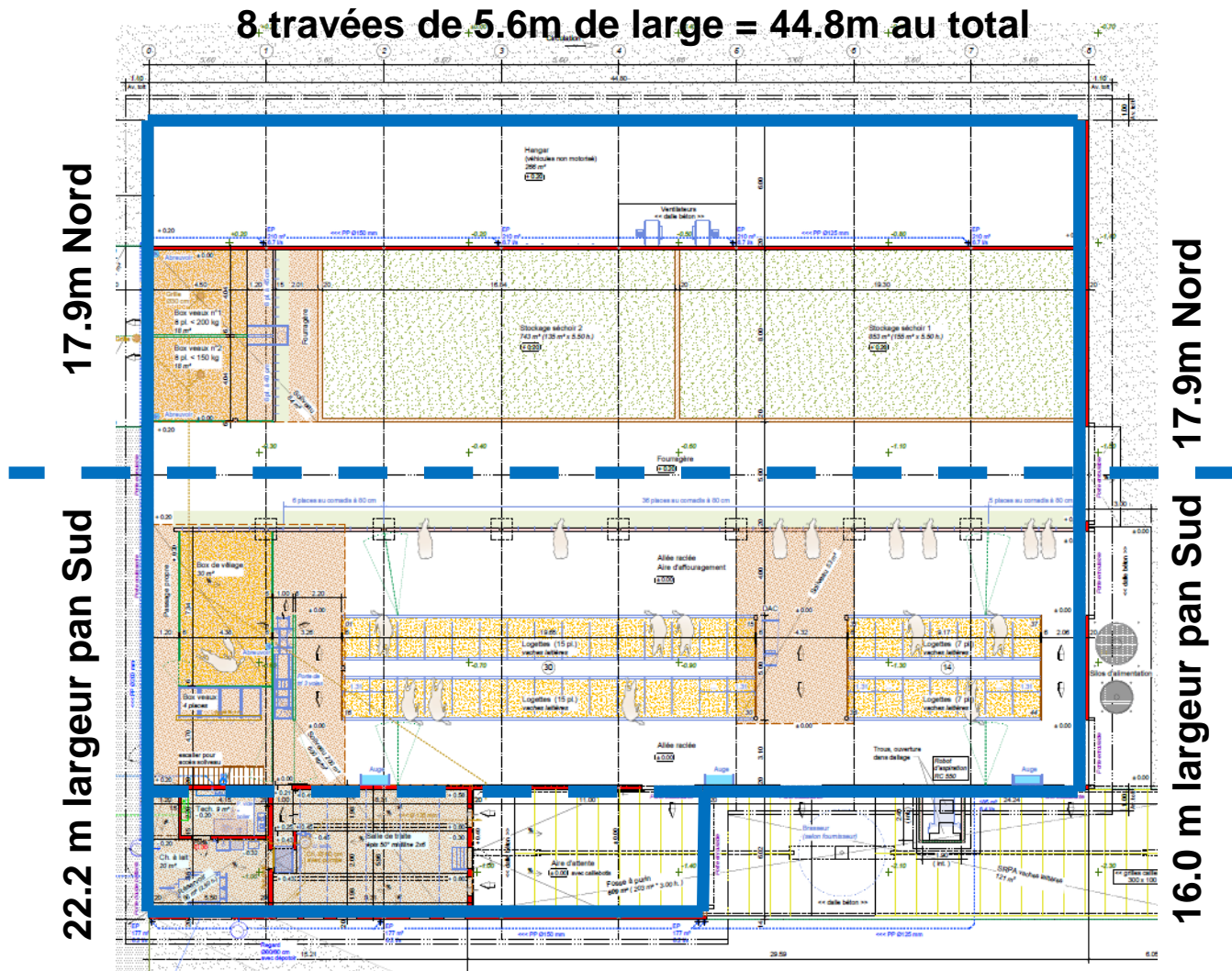


Exemple de planification



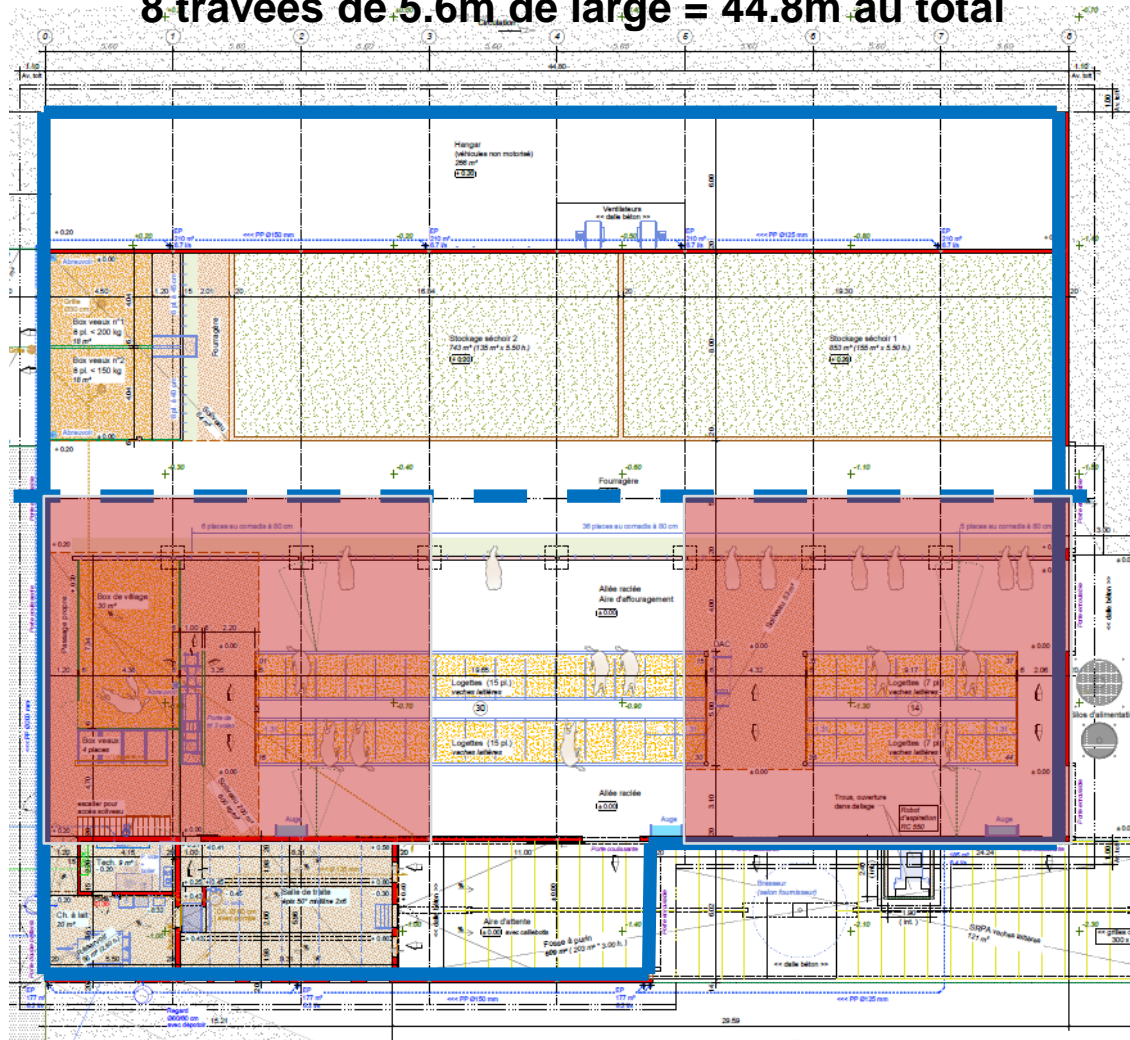
- Paramètres à connaître :
 - Grandeur du séchoir (ou des séchoirs si plusieurs en même temps)
 - Définition du débit d'air
 - Pan(s) du toit à utiliser
 - Calcul de la section minimale d'aspiration (selon vitesse de l'air et perte de pression maxi de 1 hPa)
 - Selon largeur à disposition = calcul de la hauteur des pannes
 - Vérification du gain thermique

Exemple de planification



Exemple de planification

8 travées de 5.6m de large = 44.8m au total



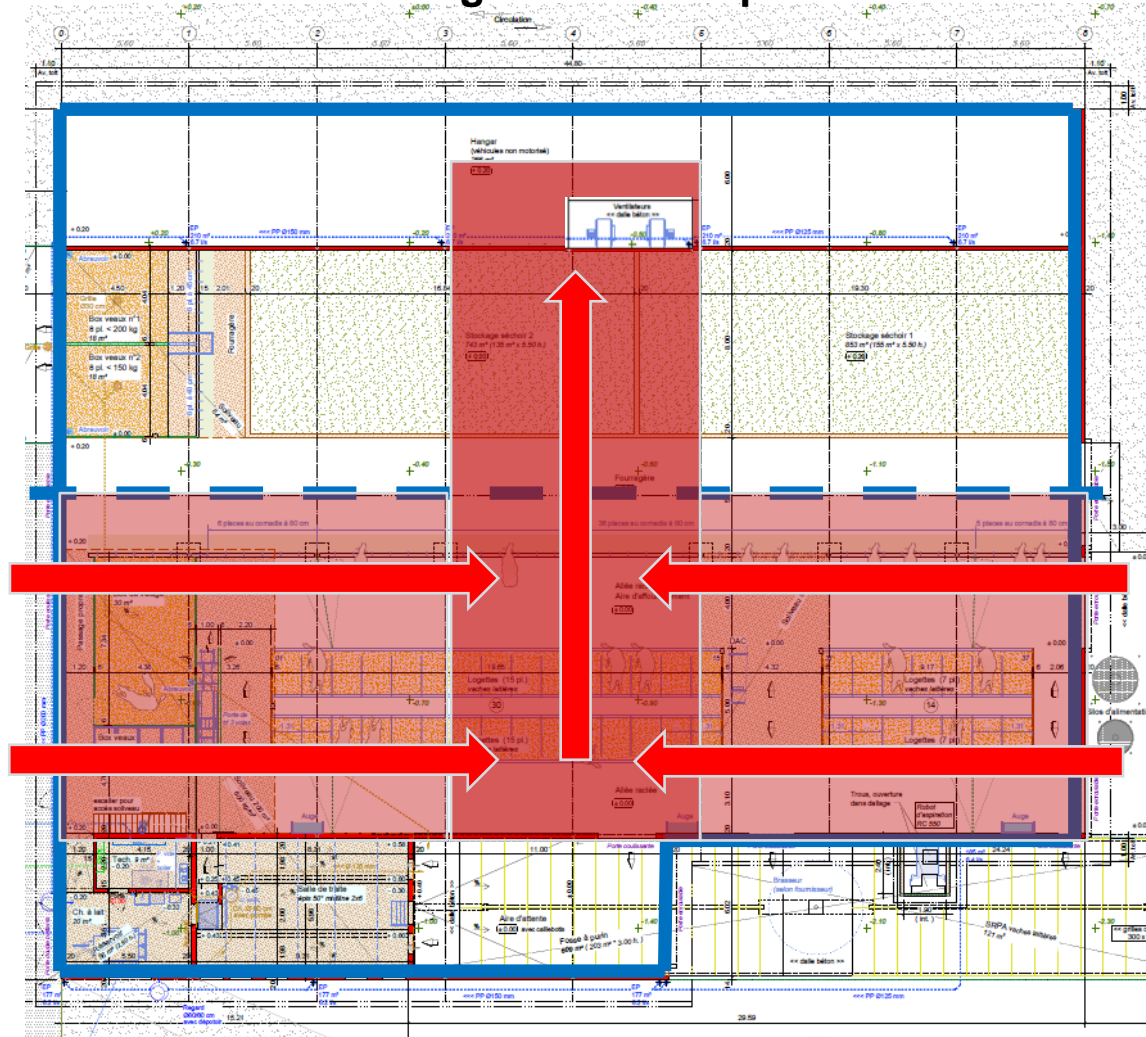
Largeur pan Sud = 16.0 m /
(cosinus 15°) = 16.56m
largeur réelle

=

14.1 m largeur nette
d'aspiration (85%)

Exemple de planification

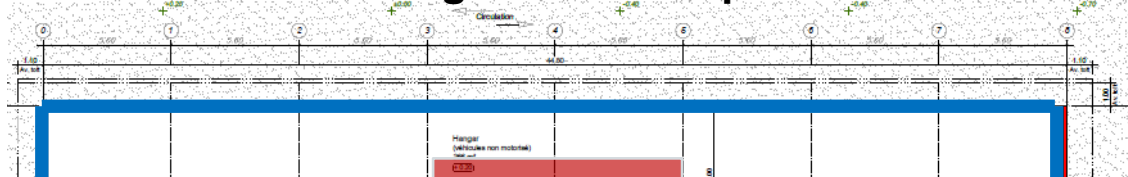
3 travées d'échauffement
= 16.8 m longueur de chaque côté



14.1 m largeur nette d'aspiration

Exemple de planification

3 travées d'échauffement
= 16.8 m longueur de chaque côté



Type de capteur: Tôle brune, ondulation transversale | Nr. de champs de capteur: 2

Longueur 1 du capteur: 16.80 m | Longueur 2 du capteur: 16.80

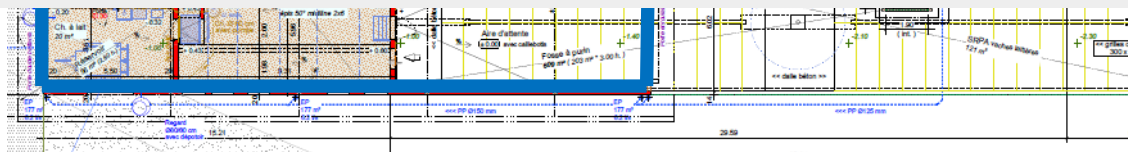
Largeur 1 du capteur: 14.10 m

Hauteur max. du chevron: 25.0 cm | Représentation: Tableau

Tas no		1	2	3	4	5	6
Base du tas	m ²	135	155	135	116	123	400
Hauteur du tas	m	5.5	5	5	7	5	5
Débit d'air du ventilateur	m ³ /s	14.85	17.05	14.85	12.8	13.5	44
Ventilateur en marche	oui/non	oui	oui	non	non	non	non
Débit d'air par rapport à la surface ...	m ³ /(s*m ²)	0.031	0.036	0	0	0	0
Vitesse de l'air (tas)	m/s	0.11	0.11	0	0	0	0
Perte de pression (tas)	Pa	554	512	0	0	0	0

Champ de capteurs 1

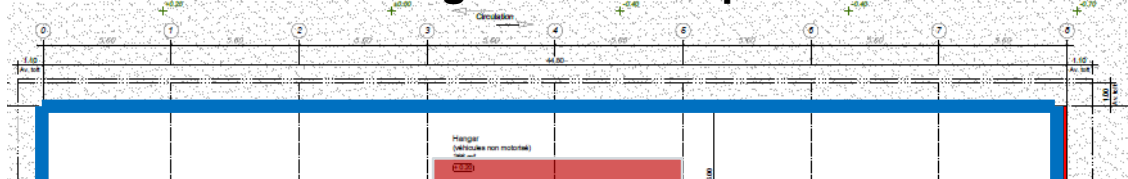
	cm	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Hauteur du canal capteur	cm	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Vitesse de l'air	m/s	4.52	4.71	4.92	5.14	5.39	5.66	5.95	6.28	6.65	7.07
Perte de pression	Pa	37	41	47	53	60	69	79	92	109	129
Rendement	%	53.1	53.5	53.9	54.3	54.8	55.4	55.9	56.6	57.3	58.1
Hausse de la température	K	5.6	5.7	5.7	5.7	5.8	5.9	5.9	6	6.1	6.1



14.

Exemple de planification

3 travées d'échauffement
= 16.8 m longueur de chaque côté



Type de capteur: Tôle brune, ondulation transversale | Nr. de champs de capteur: 2

Longueur 1 du capteur: 16.80 m | Longueur 2 du capteur: 16.80

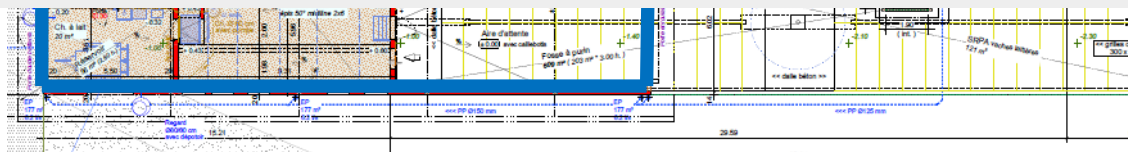
Largeur 1 du capteur: 14.10 m

Hauteur max. du chevron: 25.0 cm | Représentation: Tableau

Tas no		1	2	3	4	5	6
Base du tas	m ²	135	155	135	116	123	400
Hauteur du tas	m	5.5	5	5	7	5	5
Débit d'air du ventilateur	m ³ /s	14.85	17.05	14.85	12.8	13.5	44
Ventilateur en marche	oui/non	oui	non	non	non	non	non
Débit d'air par rapport à la surface ...	m ³ /(s ² m ²)	0.031	0	0	0	0	0
Vitesse de l'air (tas)	m/s	0.11	0	0	0	0	0
Perte de pression (tas)	Pa	540	0	0	0	0	0

Champ de capteurs 1

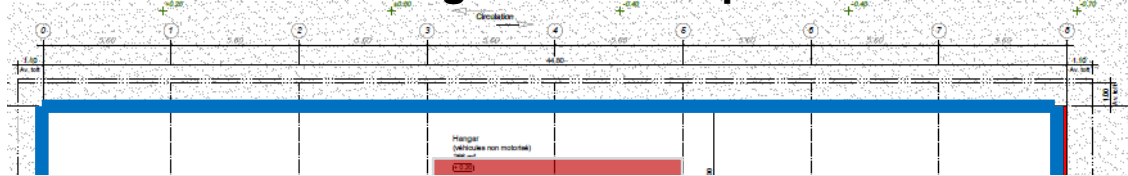
	cm	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Hauteur du canal capteur	cm	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Vitesse de l'air	m/s	2.11	2.19	2.29	2.39	2.51	2.63	2.77	2.93	3.1	3.29
Perte de pression	Pa	8	9	10	11	13	15	17	20	24	28
Rendement	%	32.9	33.5	34.1	34.7	35.4	36.1	36.9	37.7	38.6	39.6
Hausse de la température	K	7.5	7.6	7.7	7.9	8	8.2	8.4	8.6	8.8	9



14.

Exemple de planification

3 travées d'échauffement
= 16.8 m longueur de chaque côté



Type de capteur: Tôle brune, ondulation transversale | Nr. de champs de capteur: 2

Longueur 1 du capteur: 16.80 m | Longueur 2 du capteur: 16.80

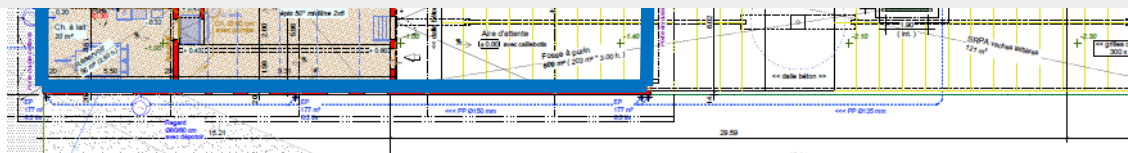
Largeur 1 du capteur: 14.10 m

Hauteur max. du chevron: 25.0 cm | Représentation: Tableau

Tas no		1	2	3	4	5	6
Base du tas	m ²	135	155	135	116	123	400
Hauteur du tas	m	5.5	5	5	7	5	5
Débit d'air du ventilateur	m ³ /s	14.85	17.05	14.85	12.8	13.5	44
Ventilateur en marche	oui/non	non	oui	non	non	non	non
Débit d'air par rapport à la surface ...	m ³ /(s ² m ²)	0	0.036	0	0	0	0
Vitesse de l'air (tas)	m/s	0	0.11	0	0	0	0
Perte de pression (tas)	Pa	0	500	0	0	0	0

Champ de capteurs 1

	cm	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Hauteur du canal capteur	cm	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Vitesse de l'air	m/s	2.42	2.52	2.63	2.75	2.88	3.02	3.18	3.36	3.56	3.78
Perte de pression	Pa	11	12	13	15	17	20	23	26	31	37
Rendement	%	36.1	36.6	37.2	37.8	38.5	39.2	39.9	40.7	41.6	42.6
Hausse de la température	K	7.1	7.2	7.4	7.5	7.6	7.7	7.9	8.1	8.2	8.4



14.

Aménagements parfois nécessaires



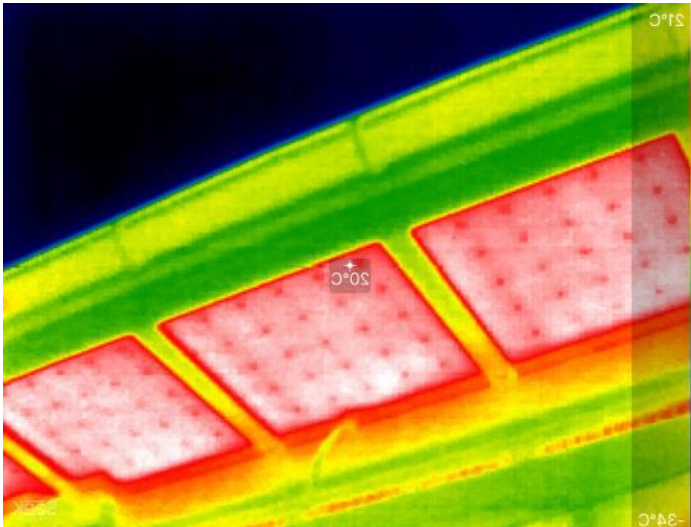
Récupération de chaleur sous tuiles

- > Peut servir à aller chercher de l'air chaud sur un autre pignon ou une autre façade



Installations solaires thermovoltaïques

- Puissance thermique = puissance électrique



Installations solaires thermovoltaïques

- Bonnes performances
- Aménagement plus complexe que RCST
- Rendement amélioré des PV +0.3 à +0.5% par °C de refroidissement

Exemple récupérateur 450 m²

(L=25 m, H=0.24 m ; séchoir=150m²)

	<i>Tôle</i>	<i>Fibrociment</i>	<i>Photovoltaïques</i>
<i>Gain thermique</i>	+8.0°	+7.3°	+8.2°
<i>Perte pression</i>	0.37 hPa	0.45 hPa	0.50 hPa



Source photo : internet

Respecter les prescriptions incendies FR-VD-NE

- Étable, entrepôt de fourrage, local d'affouragement = « bâtiment exposé au danger d'incendie »
 - Si $PV \geq 1'200 \text{ m}^2$, couche de support en sous-toiture = RF1
 - Si $< 1'200 \text{ m}^2$, couche de support = RF3 (panneaux OSB = OK)

2.1 Notions relatives à l'utilisation des matériaux de construction

1 Les matériaux de construction sont classés dans les groupes suivants, selon leur réaction au feu (RF):

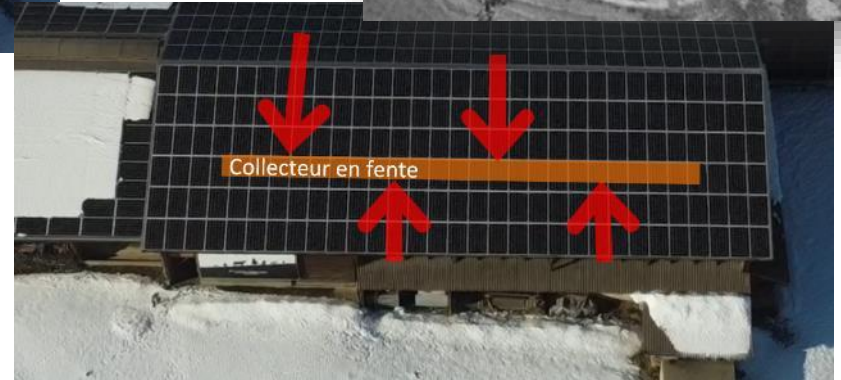
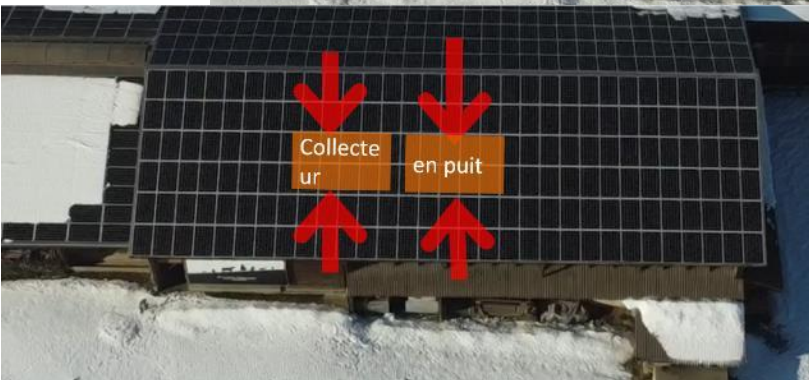
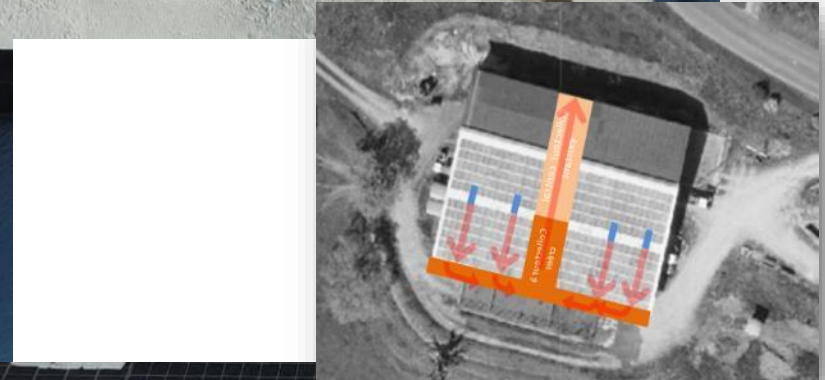
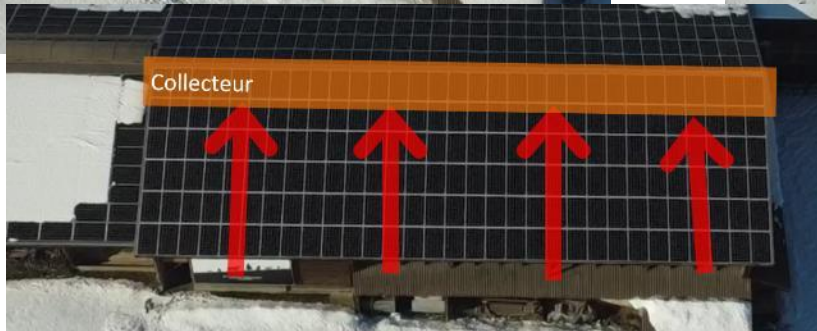
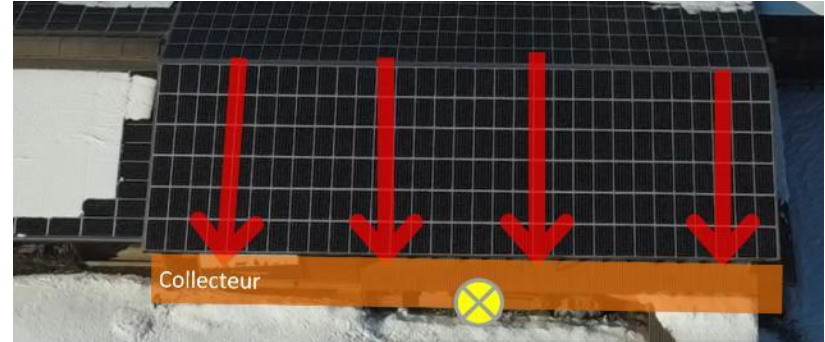
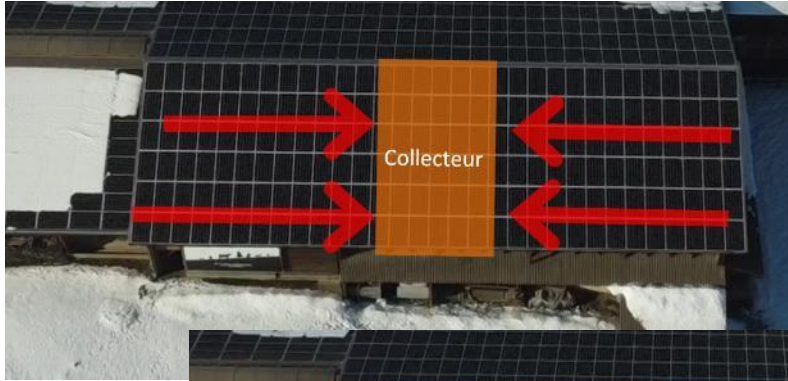
- RF1 (pas de contribution au feu);
- RF2 (faible contribution au feu);
- RF3 (contribution admissible au feu);
- RF4 (contribution inadmissible au feu).

Assurer l'aération naturelle des PV

- Nécessite une disposition particulière, ou
- petite ventilation complémentaire ou ouverture



Nombreux aménagements possibles

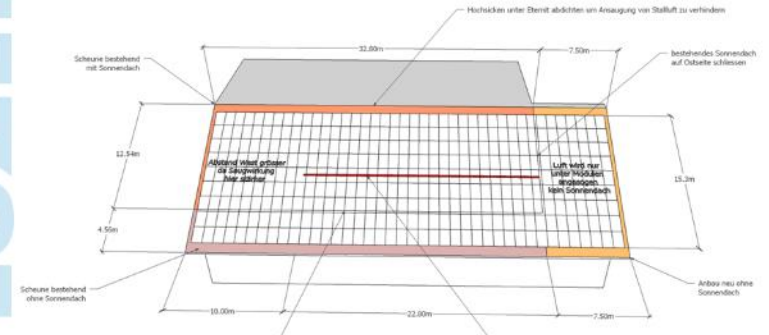


Aspiration en fente centrale



LUZERN

Aufgebaute Anlage Appert Ueli



Aspiration en pignon avec collecteur central



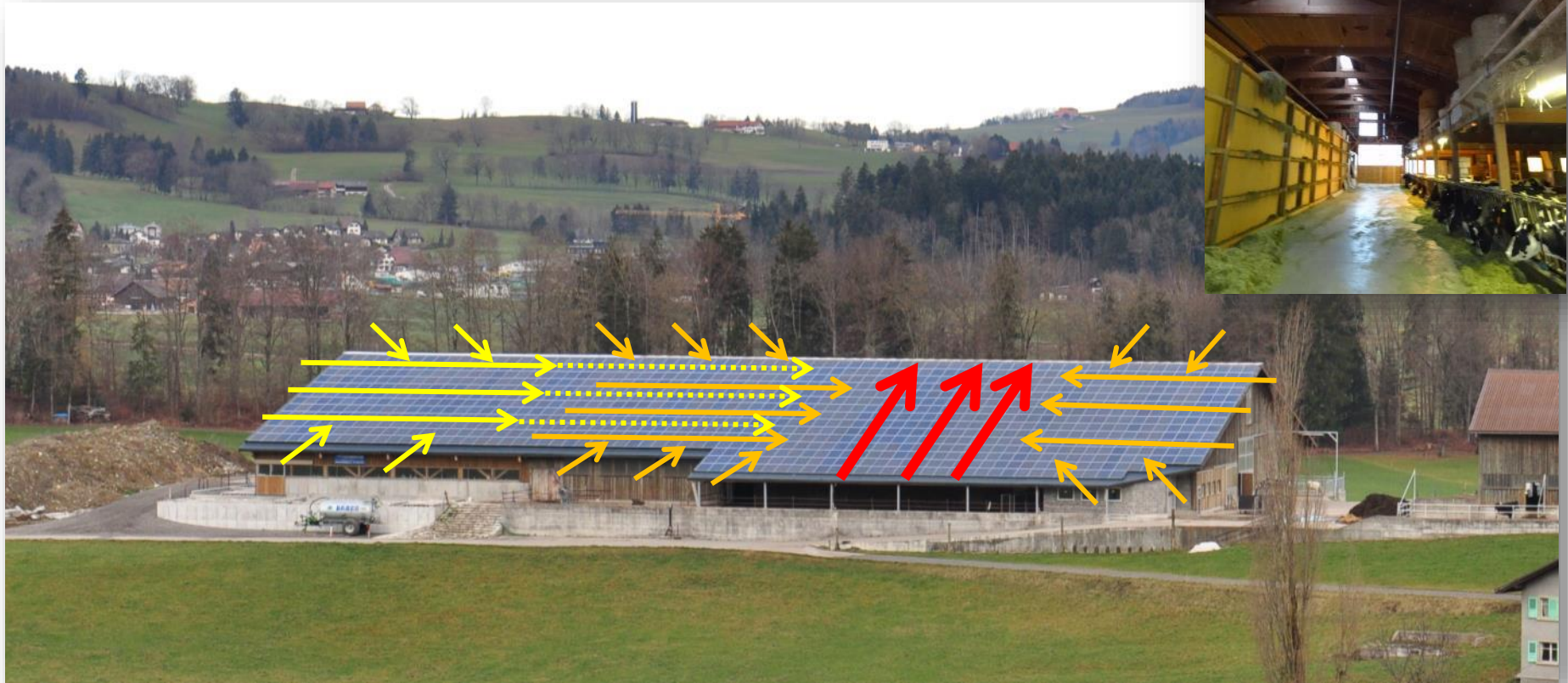
Aspiration en pignon avec collecteur central



Source : Aloïs Cachelin

Aspiration en pignon avec collecteur central

—
> Réutilisation de l'ancien RCST



Cellules photo-voltaïques en panneaux intégrés



Lattage sur ancienne toiture
(dessus)

Panneaux photovoltaïques en
couverture intégrale (droite)



Foto: Biolandhof Braun, Freising

Aspiration au bas du toit et collecteur au faîte



Exploitation Moosboden, Melchnau

Aspiration pignon, PV intégrés, sur OSB

—



Extension au faîte du toit

- Prolongation de la toiture pour assurer la collecte d'air chaud
- Mieux que sous la toiture...



Source : Matthias Kittl, Landwirtschaftskammer Salzburg

Extension au faîte du toit

- > Canal collecteur au faîte installée dans un agrandissement de la toiture

Dachabsaugung mit PV-Anlage



Genauere Berechnung
nötig!



lk Landwirtschaftskammer
Salzburg

Source : Matthias Kittl,
Landwirtschaftskammer
Salzburg

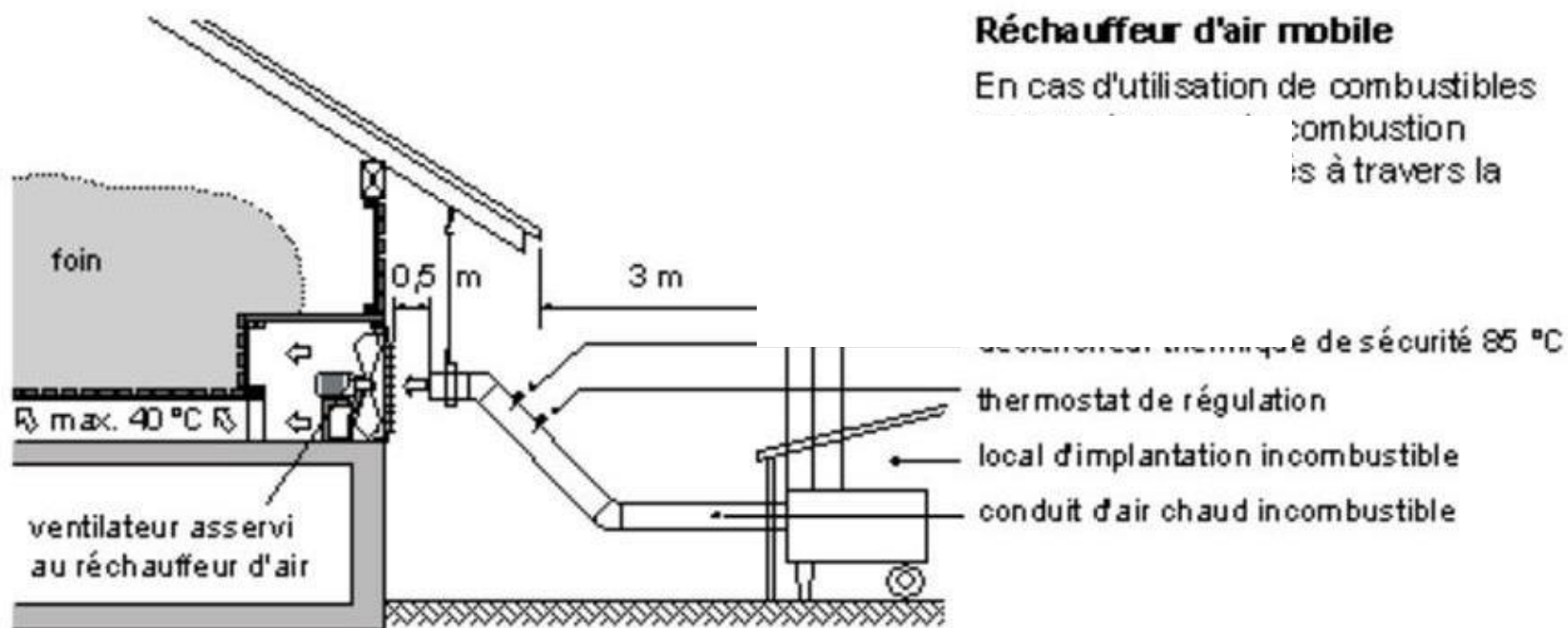
Chaudière à mazout

- > Solution bon marché à l'achat, assez chère à l'utilisation
- > Dès 10'000 CHF
- > Consommation ~10 à 15 l / h pour une chaudière de base
- > Émission de CO₂



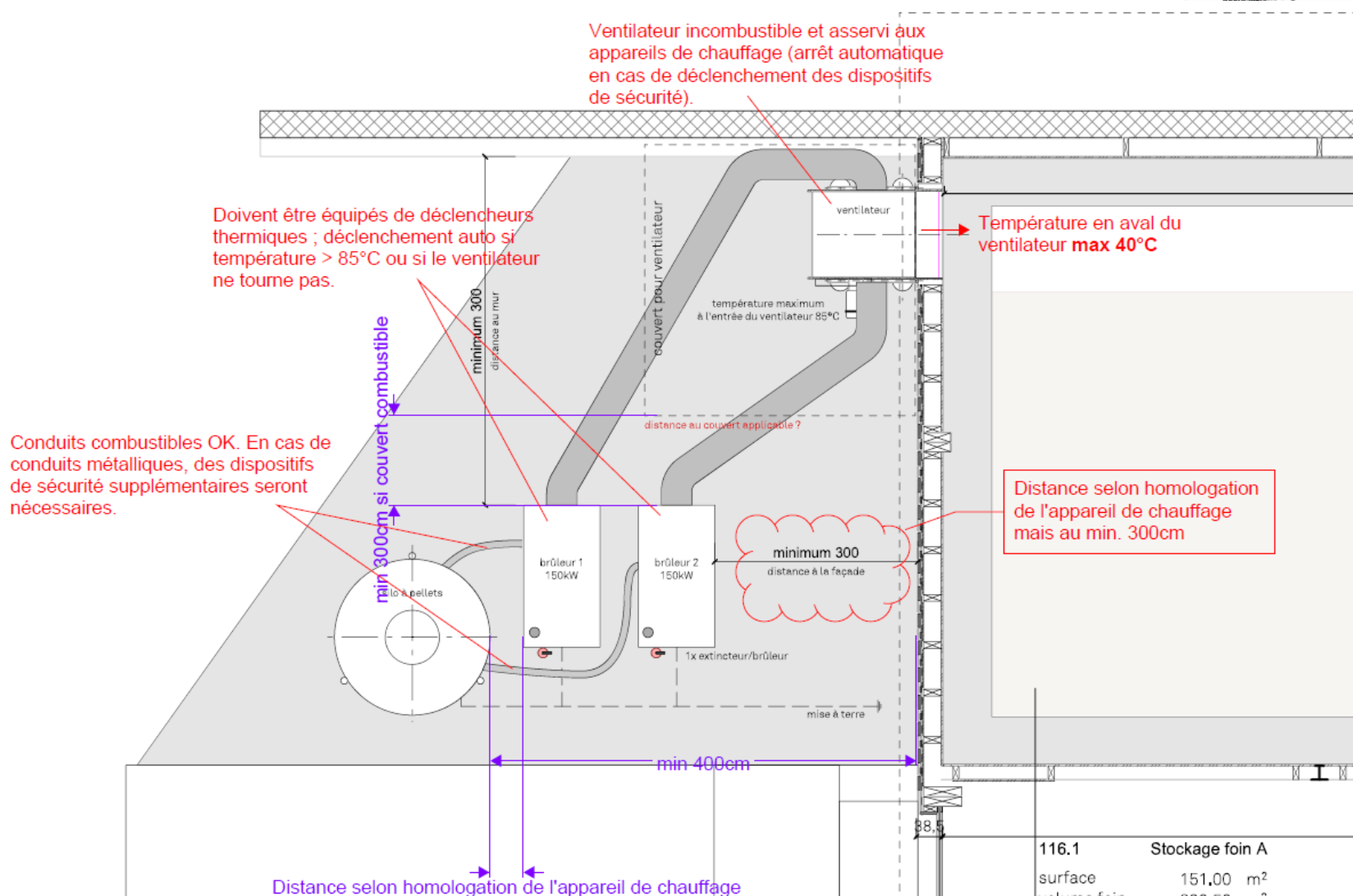
Prescriptions incendies

- > Plus de 3m de distance de la toiture pour la chaudière + cheminées
- > Beaucoup d'installations non conformes !



Source : ECAB 2021

Prescriptions incendies



116.1	Stockage foin A
surface	151,00 m ²

Dimensionnement des chaudières

> 12.5 kW pour +1°C et par tranche de 100m² de séchoir

> Calcul précis : $P = qv \times 0,34 \times \Delta T$

P en [W]

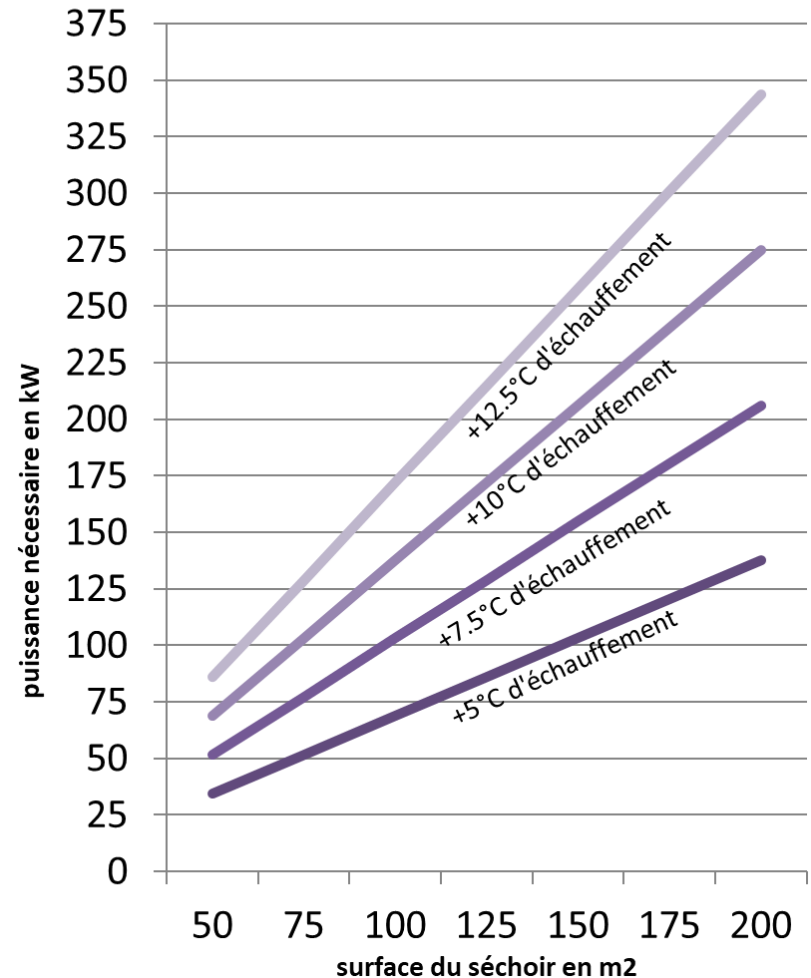
qv en [m³/h]

0,34 : Chaleur volumique de l'air en [Wh/m³.K]

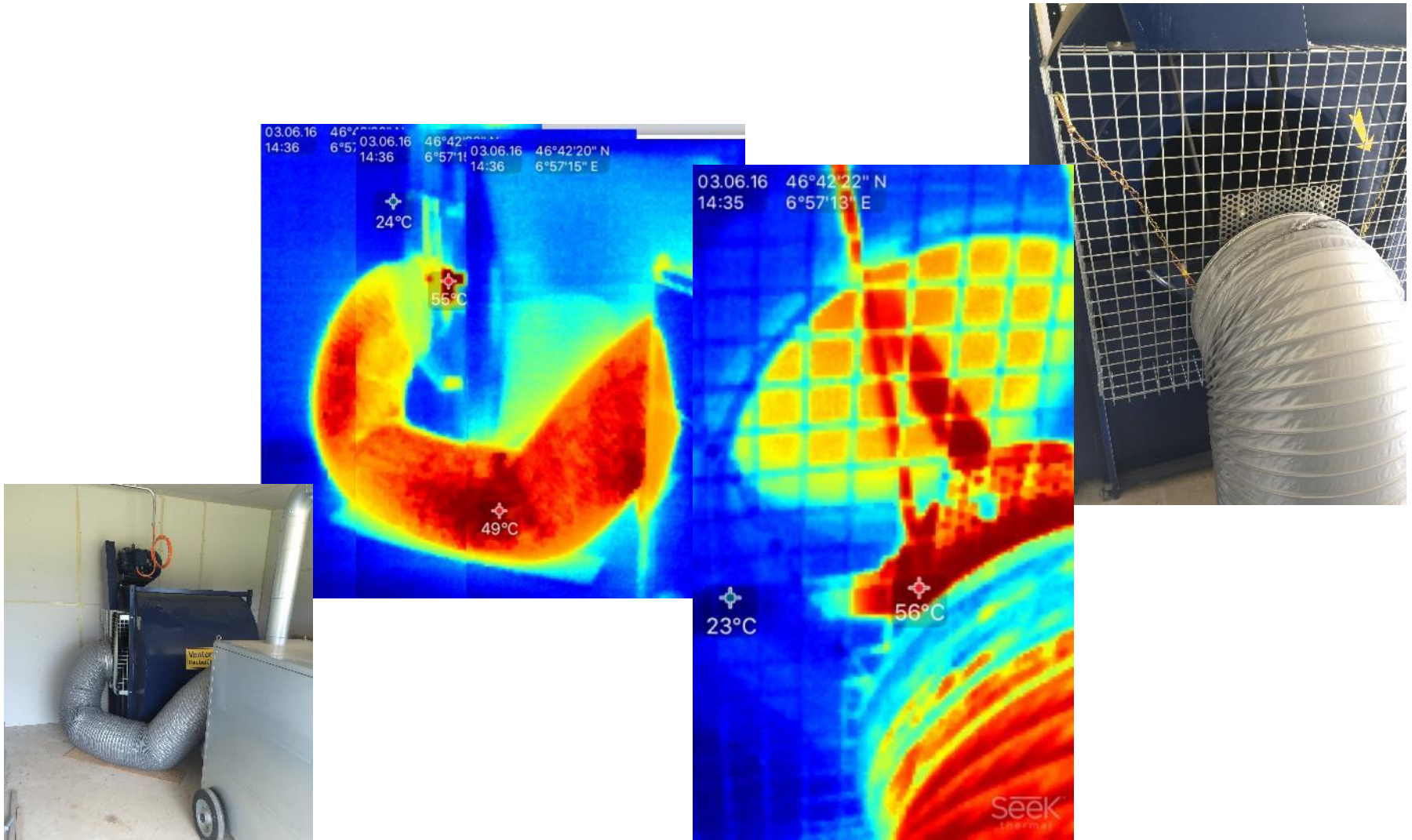
ΔT : Ecart de température reçu ou perdu par l'air en [K]

puissance de chauffage selon augmentation de température

Adapté selon Wirleitner, 2013



Assurer le mélange de l'air chaud et froid

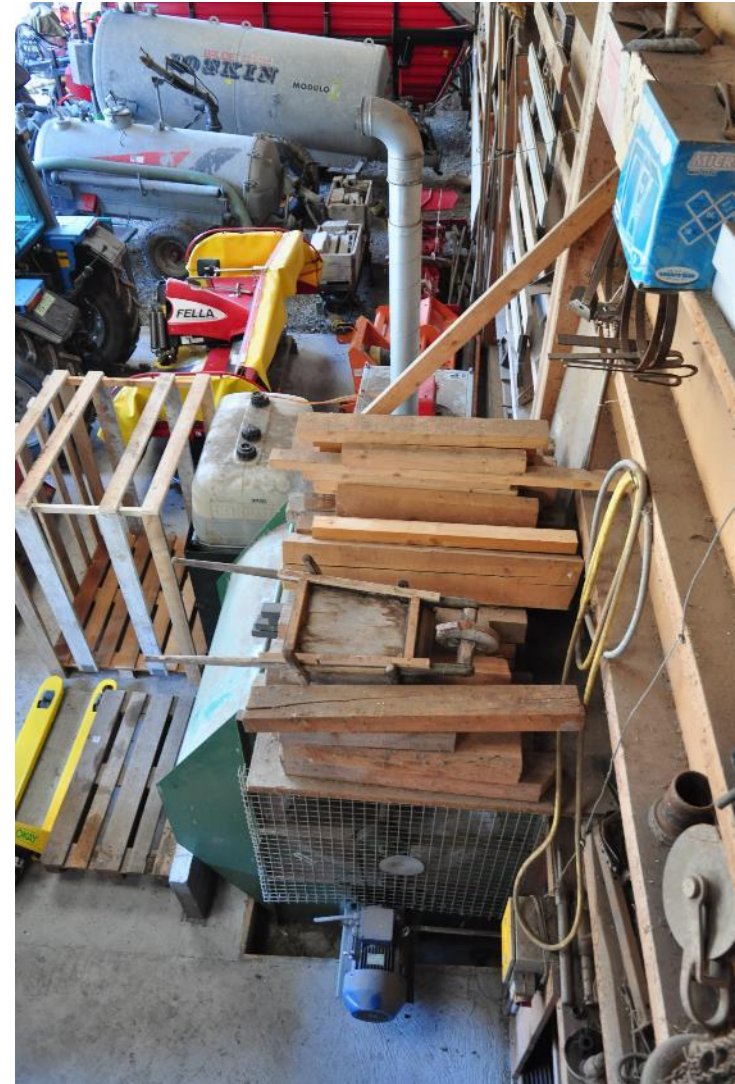


Assurer le mélange de l'air chaud et froid

Source : Antoine El Hayek



Ne pas aspirer les gaz d'échappement



Chaudière à bois : plusieurs solutions

- > Plaquettes / bûches / pellets
- > En chaleur directe ou avec échangeur eau/air
- > Dimensionnement équivalent à chaudière à mazout



(Patrick Müller, Ernetswil, 2020)

Chaudière à plaquettes / copeaux / bois déchiqueté

- > Combustible le moins cher
- > Manutention souvent nécessaire
- > Investissement relativement élevé : 50'000 à 75'000 CHF pour 150 à 250 kW
- > Consommation ~2.5 m³ pour ~ 10 heures (chaudière à 150 kW)
- > 1 l mazout = 2.1 kg pellets = 0.011 m³ plaquettes (1 m³ = 900 kWh)



Chaudière à plaquettes / copeaux / bois déchiqueté

- Plus la puissance est faible, plus la qualité des plaquettes doit être irréprochable et plus la teneur en eau doit être faible
 - **QM** recommande pour des chaudières < 200 kW le type **PFS-P16S-M20**

Exemple de code : PFS-P31S-M35

Origine : Plaquettes forestières ou de scieries

Granulométrie

P16S (F05)

P31S (F05 ou F10)

Teneur en eau

M20: < 20%

M35: 20% à 35%

Chaudière à bûches de bois

- > Très bon marché à l'achat, bois relativement bon marché, mais travail de remplissage
- > Exemple: 60kW pour 80m², < 10'000 CHF, tout manuel
- > 1 m³ bois/jour
- > Gain thermique: +8 à +10° C



Chaudière à bûches de bois



Source : Lasco

Chaudière à bois

- > Investissements intermédiaires entre chaudières à bûches et celles à plaquettes
- > Prix du combustible majoritairement aligné sur prix du pétrole
- > Déplaçable



Chaudière à pellets de bois

- > Attentions aux prescriptions incendies



Chaudière à pellets de bois

- > Location estivale pour 3'250 CHF de 50 à 250 kW + 1'200 CHF pour 3 boxes à pellets de 3000 kg pellets



Source photo: www.sutergroupe.ch

Plaquettes ou pellets ?

1 l mazout = 2.1 kg pellets = 0.011 m³ plaquettes

Émission CO₂ = 3 kg CO₂eq / l mazout vs. 0.2 pour pellets

Hackschnitzel
plaquettes
cippato



24 m³
= 24 Sm³
w = 25 % (Mischsortiment)
1 m³ = 0.833 MWh

Pellets



6 m³
= 4 t
w = 10 %
1 m³ = 3.333 MWh

Pour 20'000 kWh
d'énergie finale

ct./kWh E _{utile}	Plaquettes	Pellets
Coûts pour l'investissement	9,0	6,0
Frais en combustible	7,0	10,0
Frais entretien et maintenance	3,0	1,5
Coût total de la valeur cible	16,0-20,0	

- Nouvelle installation ou assainissement installation fossile ?
- QM recommande les plaquettes de qualité (séchées M20 et tamisées) pour les installations < 200 kW

Densité des pellets = 650-670 kg/m³

rendement énergétique : 1000 litres mazout = 1000 kWh ± 9.5 ct/kWh

plaquettes : 1 m³ de plaquettes sèches = 1000 kWh (+/- 10%)

Gazéification de bois

- > Module Spanner avec une puissance électrique de 9 à 49 kWé et une puissance thermique de 25 à 111 kWth.
- > Gazéification de bois : briquettes courtes, granulés, copeaux de rabotage, plaquettes forestières, broyat de palettes
- > Exemple Thomas Helfer, Pensier



source photo : Spanner

Génératrice d'électricité - mazout

- > Chaleur directe
- > Solution éventuelle si ampérage insuffisant



source photo : internet



Chaleur de méthanisation

Exemple Roy, Porrentruy

- > Mise en route 2008, couplage force/chaleur de 190 kW électriques et 210 kW thermiques, doublé en 2012



Source : Michel Roy, Porrentruy

Chaleur de méthanisation

Exemple Seedorf



Chaleur de méthanisation

Exemple Petermann



Accumulation d'eau chaude

> Échangeur de chaleur eau/air

> 3 m³ de stockage d'eau par heure et par tranche de 100kW de puissance

exemple 1 : séchoir demandant 150 kW de puissance avec inertie pour 12 heures = 54 m³ de stockage d'eau chaude

Ex2 : accumulateur d'eau chaude de 5'000 litres tient 2 heures si puissance attendue de 100 kW (Matthias Kittl, Landwisch.Kammer Salzburg)

Ex3 : pour chauffer 1 litre d'eau de 1K, il faut 1.162 Wh. Donc si l'eau restitue 15° dans une installation de 100 kW, il faut un volume de 5'737 litres d'eau par heure.

<https://forum.apper-solaire.org/viewtopic.php?t=102#:~:text=Exemples%20de%20calculs%20%3A,1.16%20%3D%203200%20wh%20%3D%2023.2%20Kwh>



Autres accumulations de chaleur

Béton

> Chauffage du sol béton avec gaines enterrées = accumulation de chaleur dans le béton

2 m³ béton stockent autant d'énergie que 1 m³ d'eau (source öKL, Wien 2017)

> Refroidissement de l'air de 1° par tranche de 10m de béton

Gravier

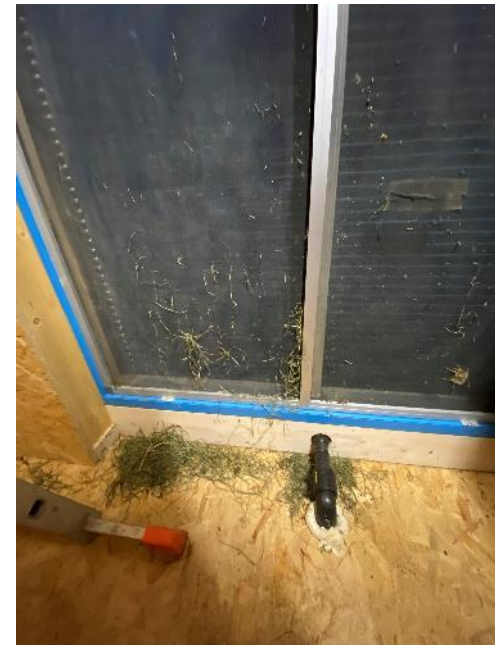
> 30-45 mm de diamètre

> 11.4 m³ de gravier = volume nécessaire pour chaque heure et par tranche de 100kW de puissance

exemple : séchoir demandant 150 kW de puissance avec inertie pour 12 heures = 205 m³ de gravier

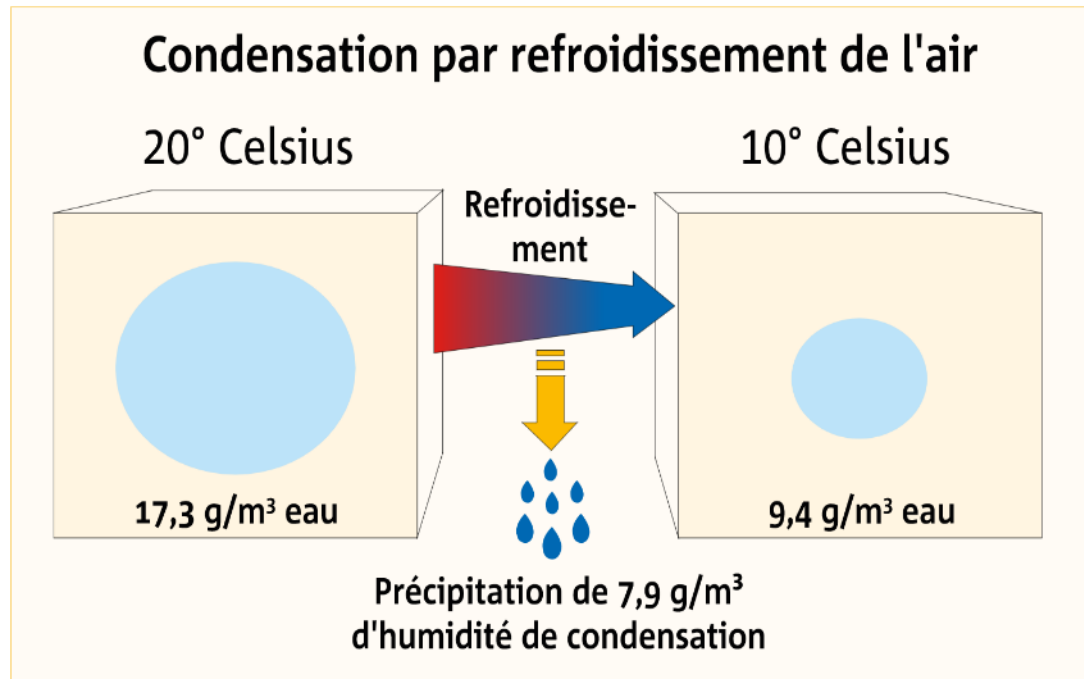
Déshumidificateur

- > Diminution de l'humidité absolue et échauffement de l'air de +5 à +8°C
- > Puissance_ventilateur/puissance_déshumidificateur = 1/1 à 1/2
- > Coûts importants : ~100'000 CHF y compris circuit fermé
- > Consommation relativement faible d'énergie, mais énergie chère
- > Nécessite un certain entretien

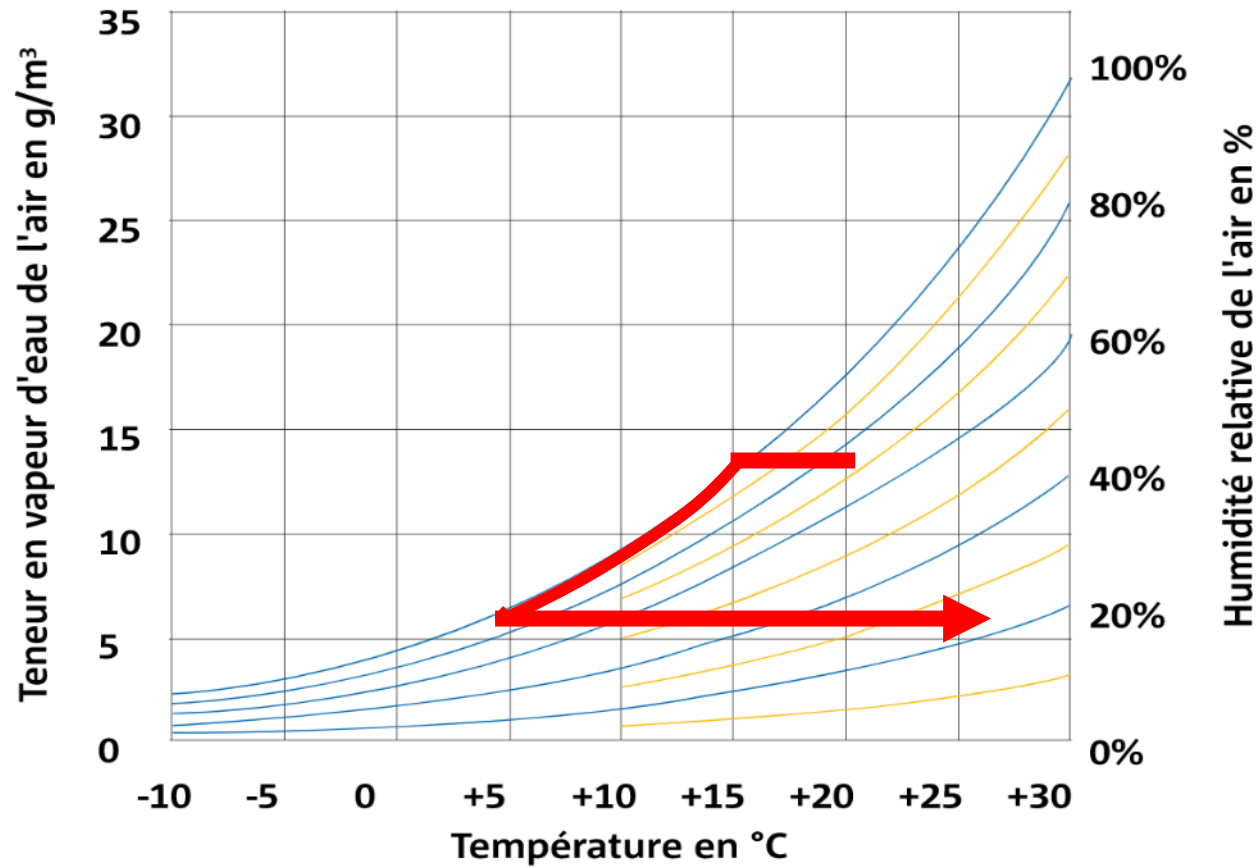


Déshumidificateur

- > Condensation de l'eau contenue dans l'air par refroidissement
- > Gain thermique lors de la condensation

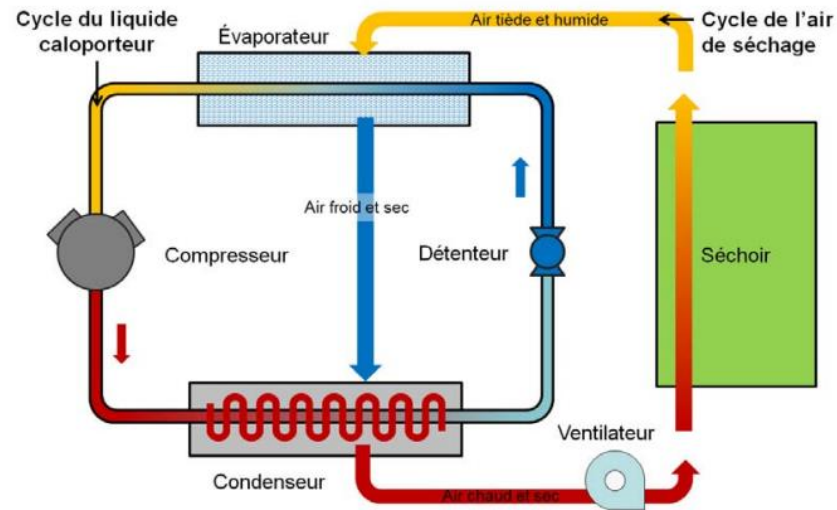
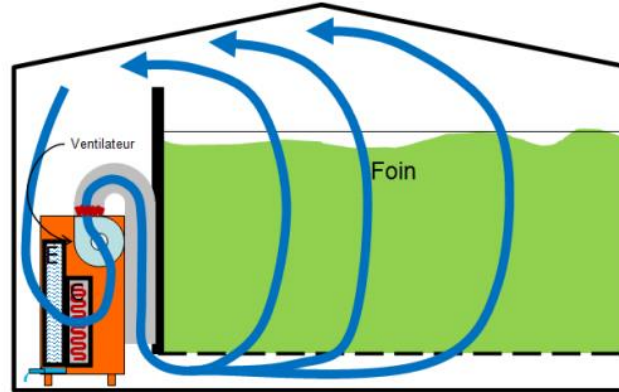


Déshumidificateur : condenser pour sécher



<https://www.schoeck.com/fr-ch/humidite-de-lair>
Valeurs du graphique pour environ 1'500 m d'altitude

Déshumidificateur



https://www.agrinova.qc.ca/wp-content/uploads/2016/09/Fiche_Sechage_foin_Agrinova_2oct2014.pdf

Déshumidificateur et circuit fermé

- > Plus l'air est humide, plus le déshumidificateur est efficace
- > Vitesse de l'air dans le condenseur à ~ 2 m/sec
- > Moins performant si températures < 10 degrés
- > Entretien régulier (filtres)



Source photo : Atelier PA Toffel

Déshumidificateur sans circuit fermé

- > Exemple sans valorisation complète de l'énergie de condensation
- > Fermer le circuit de l'air permet de réduire de 20% la consommation électrique

Source : Pöllinger, Effizienzerhöhung von heutrocknungsanlagen, 2020



Déshumidificateur

Liste fournisseurs – état janvier 2021

RTS

Contact: heutrocknung@aon.at
Site: www.rts-heutrocknung.com/
Vidéo:



HSR

Contact: info@griesser-kaeltetechnik.ch
Site: www.heutrocknung.com/fr/produits
Vidéo: www.heutrocknung.com/fr/le-systeme



Zemp

Contact: info@heutrocknung.net
Site: www.heutrocknung.net/produkte/
Vidéo:



Agravent

Contact: info@agravent.com
Site: www.agravent.com/geraete/waermepumpen-luftentfeuchter/
Vidéo:



Lasco

Contact: office@lasco.at
Site: www.lasco.at/fr/
Vidéo: www.lasco.at/fr/deshumidificateur-dair-haytec-pour-le-sechage/
(bas de page)



Arwego

Contact: a.schneider@arwego.de
Site: www.arwego.de/
Vidéo:



Frigortec

Contact: info@frigortec.de
Site: www.frigortec.com/fr/
Vidéo: www.frigortec.com/fr/produits/agrifrigor/ (bas de page)



RMH

Contact: info@sumag.ch
Site: www.2015.r-m-h.at/rmh-luftentfeuchter/
Vidéo:

