

**Travail de fin d'études et stage[BR]- Travail de fin d'études : Conception d'un incubateur pour la promotion du développement rural de pays en voie de développement[BR]- Stage d'insertion professionnelle**

**Auteur :** Dembour, Juliette

**Promoteur(s) :** Lemort, Vincent

**Faculté :** Faculté des Sciences appliquées

**Diplôme :** Master en ingénieur civil électromécanicien, à finalité spécialisée en énergétique

**Année académique :** 2020-2021

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/11566>

---

*Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---

```
1: $Keyboard US
2:
3: "! MODELISATION COUVEUSE - TFE 2020-2021"
4:
5: " Auteure : Juliette Dembour "
6: " Dernière modification : le 08-06-2021 "
7:
8:
9: "! Définition de fonctions utilisées dans le corps du code "
10:
11: " Fonction de chauffe, par palier "
12:
13: Function heater_on_off(T_in_n,tau,DELTAtau,N_res_max)
14:
15: " Nombre de paliers de chauffe : de 0 à N_res_max "
16: " Utilisation de la valeur précédente de T_in, nécessaire pour la convergence "
17:
18: T_in = integralvalue(tau - DELTAtau,'T_in')
19: heater_on_off_0 = integralvalue(tau-DELTAtau,'Q_dot_on_off')
20: heater_on_off := heater_on_off_0
21:
22: " Ajustement du chauffage si écarte de 0,5 par rapport à T_in_n = Température de consigne "
23:
24: If (T_in > (T_in_n + 0.5) ) and (heater_on_off_0 > 0) Then
25: heater_on_off := heater_on_off_0 - 1
26: Endif
27:
28: If (T_in < (T_in_n - 0.5) ) and (heater_on_off_0 < N_res_max) Then
29: heater_on_off := heater_on_off_0 + 1
30: Endif
31:
32: If (heater_on_off > N_res_max) Then
33: heater_on_off := N_res_max
34: Endif
35:
36: If (heater_on_off < 0.00001) Then
37: heater_on_off := 0
38: Endif
39:
40: End
41:
42:
43: " Fonctions de détection de dépassement des limites de température "
44:
45: Function t_max_7(T_in_n,tau,DELTAtau)
46: " Nombre de périodes de temps pendant lesquelles la 1ère limite sup (0,7°C) est dépassée "
47:
48: T_in = integralvalue(tau - DELTAtau,'T_in')
49: t_up_0 = integralvalue(tau - DELTAtau,'T_up_7')
50: t_max_7 := t_up_0
51:
52: If (T_in > T_in_n + 0.7 ) Then
53: t_max_7 := t_up_0 + 1
54: Else
55: t_max_7 := 0
56: Endif
57:
58: End
59:
60: Function t_min_7(T_in_n,tau,DELTAtau)
61: " Nombre de périodes de temps pendant lesquelles la 1ère limite inf (0,7°C) est dépassée "
```

```
62:
63: T_in = integralvalue(tau - DELTAtau,'T_in')
64: t_down_0 = integralvalue(tau - DELTAtau,'T_down_7')
65: t_min_7 := t_down_0
66:
67: If (T_in < (T_in_n - 0.7) ) Then
68: t_min_7 := t_down_0 + 1
69: Else
70: t_min_7 := 0
71: Endif
72:
73: End
74:
75:
76: Function t_warning_35_6(T_in_n,tau,DELTAtau)
77: " Alerte si la limite inférieure absolue est dépassée "
78:
79: T_in = integralvalue(tau - DELTAtau,'T_in')
80: t_down_0 = integralvalue(tau-DELTAtau,'T_down_max')
81: t_warning_35_6 := t_down_0
82:
83: If (T_in < 35.6 ) Then
84: t_warning_35_6 := t_down_0 + 1
85: Else
86: t_warning_35_6 := 0
87: Endif
88:
89: End
90:
91:
92: Function t_warning_39_4(T_in_n,tau,DELTAtau)
93: " Alerte si la limite supérieure absolue est dépassée "
94:
95: T_in = integralvalue(tau - DELTAtau,'T_in')
96: t_up_0 = integralvalue(tau-DELTAtau,'T_up_max')
97: t_warning_39_4 := t_up_0
98:
99: If (T_in > 39.4 ) Then
100: t_warning_39_4 := t_up_0 + 1
101: Else
102: t_warning_39_4 := 0
103: Endif
104:
105: End
106:
107:
108: Function t_d_death(T_in_n,tau,DELTAtau)
109: " Mort des oeufs si dépassement de la limite pendant 2h "
110:
111: T_in = integralvalue(tau - DELTAtau,'T_in')
112: t_down_7_0 = integralvalue(tau-DELTAtau,'T_down_7')
113: t_down_death= integralvalue(tau-DELTAtau,'T_down_death')
114: t_d_death := t_down_death
115:
116: " 2 * 3600/DELTAtau = nombre de périodes de temps dans 2h "
117: If (T_down_7_0 = 2 * 3600/DELTAtau ) Then
118: t_d_death := t_down_death + 1
119: Endif
120:
121: End
```

```

122:
123:
124: Function t_u_death(T_in_n,tau,DELTAtau)
125:  " Mort des oeufs si dépassement de la limite pendant 2h "
126:
127: T_in = integralvalue(tau - DELTAtau,'T_in')
128: t_up_7_0 = integralvalue(tau-DELTAtau,'T_up_7')
129:
130: t_up_death = integralvalue(tau-DELTAtau,'T_up_death')
131: t_u_death := t_up_death
132:
133:  " 2 * 3600/DELTAtau = nombre de périodes de temps dans 2h "
134: If (T_up_7_0 = 2 * 3600/DELTAtau ) Then
135: t_u_death := t_up_death +1
136: Endif
137:
138: End
139:
140:
141: Function t_d_warning(T_in_n,tau,DELTAtau)
142:  " Nombre de périodes alerte de dépassement pendant 1h "
143:
144: T_down_alert_1 = integralvalue(tau - 2*DELTAtau,'T_down_alert')
145: T_down_alert_0 = integralvalue(tau - DELTAtau,'T_down_alert')
146: T_down_warning = integralvalue(tau - DELTAtau,'T_down_warning')
147: t_d_warning := T_down_warning
148:
149: If (T_down_alert_0 = 1 ) and (T_down_alert_1 = 0) Then
150: t_d_warning := T_down_warning + 1
151: Endif
152:
153: End
154:
155: Function t_u_warning(T_in_n,tau,DELTAtau)
156:  " Nombre de périodes alerte de dépassement pendant 1h "
157:
158: T_up_alert_1 = integralvalue(tau - 2*DELTAtau,'T_up_alert')
159: T_up_alert_0 = integralvalue(tau - DELTAtau,'T_up_alert')
160: T_up_warning = integralvalue(tau - DELTAtau,'T_up_warning')
161: t_u_warning := T_up_warning
162:
163: If (T_up_alert_0 = 1 ) and (T_up_alert_1 = 0) Then
164: t_u_warning := T_up_warning + 1
165: Endif
166:
167: End
168:
169:
170: Function t_d_alert(T_in_n,tau,DELTAtau)
171:  " 0 ou 1, 1 si dépassement des limites pendant 1h (acceptable mais attention) "
172:
173: T_in = integralvalue(tau - DELTAtau,'T_in')
174: t_down_7_0 = integralvalue(tau-DELTAtau,'T_down_7')
175:
176: t_d_alert := 0
177:
178:  " 1 * 3600/DELTAtau = nombre de périodes de temps dans 1h "
179: If (T_down_7_0 > round(1 * (3600-DELTAtau)/DELTAtau) ) Then
180: t_d_alert := 1
181: Endif

```

```

182:
183: End
184:
185:
186: Fonction t_u_alert(T_in_n,tau,DELTAtau)
187: " 0 ou 1, 1 si dépassement des limites pendant 1h (acceptable mais attention) "
188:
189: T_in = integralvalue(tau - DELTAtau,'T_in')
190: t_up_7_0 = integralvalue(tau-DELTAtau,'T_up_7')
191:
192: t_u_alert := 0
193:
194: " 1 * 3600/DELTAtau = nombre de périodes de temps dans 1h "
195: If (T_up_7_0 > round(1 * (3600-DELTAtau)/DELTAtau) ) Then
196: t_u_alert := 1
197: Endif
198:
199: End
200:
201:
202: "! Caisson"
203:
204: "Dimensions"
205:
206: "Géométrie selon les dimensions réelles considérées"
207:
208: " Ces trois dimensions sont les dimensions intérieures "
209: h = 1.22 [m] - t_frig "[m]" "1220 mm - épaisseur frigolite"
210: Long = 1.006 [m] - 2*t_frig "[m]"
211: Larg = 0.697 [m] - t_frig "[m]"
212:
213: surface_in = Long*Larg "[m^2]"
214: volume_in = h * surface_in "[m^3]"
215:
216: " Pas de fenêtre considérée dans un premier temps, en étudier l'impact pour le produit fini"
217: h_window = 0 * 0.7 [m] "! Fenêtre? "
218: l_window = 0.3 [m]
219: S_window = h_window * l_window
220: U_window = 3 [W/m^2-K]
221:
222: " A_hex_in = surface des murs latéraux et du toit, tous composés des mêmes matériaux"
223: A_hex_in = surface_in + 2*h*(Long + Larg) - S_window "S_window = 0"
224: A_hex_out = (Long + e_mur)*(Larg + e_mur) + 2 * (h + e_mur) * ((Long + e_mur) + (Larg + e_mur) ) - S_window "S_window = 0"
225: A_hex_mean = (A_hex_in + A_hex_out)/2
226:
227: "properties of isolation materials"
228: k_frig = 0.05 [W/m-K] " valeur de la frigolite de chez Hubo "
229: k_btplx = 0.14 [W/m-K] "moyenne de ce qu'on trouve sur Internet - hypothèse"
230:
231: "! Paramètres"
232:
233: " Nombre d'oeufs "
234: n_eggs = n_plates * n_egg_plate
235: n_egg_plate = n_egg_row^2 " plateaux carrés "
236: n_egg_row = 7 " Nombre d'oeufs par rangées "
237: n_plates = 3 " nombre de plateaux "
238:
239: " Production de chaleur des oeufs incubés"
240: Q_dot_egg_mW = interpolate1('Q_dot_heat_egg','Q_dot_evapo','t',t = tau_jour_incub) + interpolate1('Q_dot_heat_egg'

```

```

,Q_dot_heat','t', t = tau_jour_incub) "[mW]"
241: "19 mW en tout temps (via évapo de l'eau), augmentation de la chaleur pendant l'incubation, jusqu'à 130 mW à la fin "
242: Q_dot_egg = Q_dot_egg_mW / 1000
243: Q_dot_eggs = Q_dot_egg * n_eggs
244:
245: t_btplx = 0.018 " épaisseur du betonplex utilisé "
246: Q_dot_heater_n = 10 [W] " Valeur d'un palier de chauffe = la chauffe est varié par pas de 10 W "
247:
248: "! Apport d'air frais"
249: " procédure orifice "
250:
251: m = 0
252: ACH = 0.3 " Air Change per Hour, hypothèse "
253: V_dot_n = ACH * volume_in "débit entrant dans la couveuse par infiltration"
254: V_dot_in = V_dot_n *convert ('m^3/h', 'm^3/s') " volume s'infiltrant dans la couveuse [m^3/s] "
255: V_dot_out = V_dot_in
256:
257:
258: "! Données (climatiques) TMY, depuis https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\_tools/fr/#TMY "
259:
260: " Simu_type$ est le mois simulé : janvier, mars, juillet "
261: T_out = interpolate1(Simu_type$, 'T_out', 't', t=tau_h) " Température extérieure "
262: V_air_out = interpolate1(Simu_type$, 'v_wind', 't', t = tau_h) " vitesse du vent - air extérieur "
263: RH_out = interpolate1(Simu_type$, 'RH', 't', t=tau_h) " taux d'humidité extérieure "
264:
265: T_kelvin = 273.15 [°C]
266: T_i = 37.5 [°C] " température initiale dans la couveuse "
267:
268:
269: T_in_n = 37.5 [°C]
270:
271: " Properties of air"
272: P_a = 101325 [Pa] " 1 atm "
273: rho_a = density(Air_ha, T=T_out, P=P_a)
274: cp_a = cp(Air_ha, T=T_out, P=P_a)
275: k_a = conductivity(Air_ha, T=T_out, P=P_a)
276: mu_a = viscosity(Air_ha, T=T_out, P=P_a)
277:
278: "air side heat transfer coefficient intérieure et extérieur"
279:
280: h_air_out = 5.7 + 3.8 * V_air_out " hypothèse depuis ASHRAE handbook "
281: h_air_out_mean = integral(h_air_out, tau, tau_1, tau_2, DELTatau)/(tau_2-tau_1)
282: h_air_in = 10 [W/m^2-K] " hypothèse "
283:
284: R_a_out = 1/(h_air_out * A_hex_out) " résistance de l'air "
285: R_a_in = 1/(h_air_in * A_hex_in)
286:
287:
288: "! Code PCM" " le commenter entièrement pour simuler sans PCM "
289:
290:
291: " HYPOTHESE : PCM placé dans les parois de la couveuse, entre deux couches de frigolite "
292:
293: t_frig_in = 0.01 " épaisseur minimale pour pouvoir placer le PCM à l'intérieur des parois - HYPOTHESE "
294: t_frig = t_frig_in + t_frig_out
295:
296: R_frig_in = t_frig_in / (A_hex_in * k_frig)
297: R_frig_out = t_frig_out / (A_hex_out * k_frig)
298: R_btplx_out = t_btplx / (A_hex_out * k_btplx)
299:

```

```

300: PCM_type$ = " 'PCMcurve_35' " 'PCMcurve_35_HC' " 2 types différents peuvent être simulés "
301: e_PCM = 0.007 "0,005" " choisir selon la configuration à simuler "
302: e_mur = e_PCM + t_frig + t_btplx
303:
304: V_PCM = A_hex_mean * e_PCM " volume de PCM "
305: M_PCM = V_PCM * rho_PCM_0 " masse de PCM "
306: rho_PCM_0 = interpolate1(PCM_type$, 'rho', 'T_mat', T_mat = T_pcm_0)
307: rho_PCM = interpolate1(PCM_type$, 'rho', 'T_mat', T_mat = T_pcm)
308: " la masse volumique varie légèrement selon la phase "
309:
310: "PCM side heat transfer coefficient - BOTH SIDES"
311: R_PCM = e_PCM/2 / (k_PCM*A_hex_mean)
312: k_PCM = 0.2 * c_natural
313: c_natural = 2 "pour modéliser les transferts de chaleur au sein du PCM par convection naturelle"
314:
315: 1/AU_in = (R_frig_in ) + R_a_in + R_PCM
316: 1/AU_out = (R_frig_out + R_btplx_out ) + R_a_out + R_PCM
317:
318: AU_in_mean = integral(AU_in, tau, tau_1, tau_2, DELTatau)/(tau_2-tau_1)
319: AU_out_mean = integral(AU_out, tau, tau_1, tau_2, DELTatau)/(tau_2-tau_1)
320:
321: Q_dot_in = AU_in * (T_in - T_PCM ) " positif si T_in > T_PCM = charge du PCM"
322: Q_dot_out = Au_out * (T_PCM - T_out ) "positif si T_PCM > T_out = décharge du PCM"
323:
324: "Bilan sur le PCM"
325:
326: dUdtau = Q_dot_in - Q_dot_out "positif si charge du PCM"
327: DELTAu = integral(dUdtau, tau, tau_1, tau_2, DELTatau)
328: DELTAu = M_PCM*(h_PCM - h_PCM_0) " dh=du+Pdv+vdP: Pconstant et Pdv très faible => dh=du"
329: h_PCM = interpolate1(PCM_type$, 'h_PCM', 'T_mat', T_mat = T_pcm)
330: h_PCM_0 = interpolate1(PCM_type$, 'h_PCM', 'T_mat', T_mat=T_pcm_0)
331: T_pcm_0 = 35 [°C] " température initiale du PCM "
332:
333: T_PCM_mean = integral(T_PCM, tau, tau_1, tau_2, DELTatau)/(tau_2-tau_1)
334:
335:
336: N_res_max = 6 " nombre de paliers de chauffe - 6 avec 50 mm de frigolite et 9 avec 30 mm de frigolite "
337: t_frig = 0.05 " épaisseur totale de frigolite, choix justifié dans le TFE "
338:
339:
340: "! Code sans PCM - Echanges par conduction" " le commenter entièrement pour simuler avec PCM "
341:
342: "par les parois latérales et le plafond de la couveuse"
343:
344:
345: " Matériaux caisson "
346:
347: {" Utilisation du code Wall - characteristics pour obtenir les valeurs de U_wall, C_wall, theta_wall, phi_wall"
348: " TYPE 1 : contreplaqué 18mm, frigolite 5 cm "
349: " TYPE 2 : contreplaqué 18mm, frigolite 3 cm "
350: }
351:
352:
353: Wall_type = 1 "! choisir, 1 - 50 ou 2 - 30"
354: e_mur = t_btplx + t_frig "une seule épaisseur de btplx "
355:
356: U_wall = interpolate1('Data_proc', 'U_wall', 'Walltype', Walltype = Wall_type)
357: C_wall = interpolate1('Data_proc', 'C_wall', 'Walltype', Walltype = Wall_type)
358: theta_wall = interpolate1('Data_proc', 'theta_wall', 'Walltype', Walltype = Wall_type)
359: phi_wall = interpolate1('Data_proc', 'phi_wall', 'Walltype', Walltype = Wall_type)

```

360:

361:  $AU_{wall\_ext} = A_{hex\_mean} * U_{wall}$

362:  $R_{wall\_ext} = 1/AU_{wall\_ext}$

363:

364:  $Q_{dot\_out} = 1/((R_{wall\_ext} * (1 - \theta_{wall})) + R_{a\_out}) * (T_{wall\_ext} - T_{out})$  "*R<sub>a\_out</sub> modélise la résistance de l'air*"

365: "*positif si le mur se refroidit vers l'air extérieure* "

366:  $Q_{dot\_in} = 1/((R_{wall\_ext} * \theta_{wall}) + R_{a\_in}) * (T_{in} - T_{wall\_ext})$  "*R<sub>a\_in</sub> modélise la résistance de l'air*"

367: "*positif si l'air intérieur se décharge vers le mur (toujours le cas)* "

368:  $Q_{dot\_in} - Q_{dot\_out} = dU/d\tau_{wall\_ext}$

369:

370:  $DELTAU_{wall\_ext} = \text{integral}(dU/d\tau_{wall\_ext}, \tau, \tau_1, \tau_2, DELTA\tau)$

371:  $DELTAU_{wall\_ext} = C_{wall\_ext} * (T_{wall\_ext} - T_{wall\_ext\_0})$

372:  $T_{wall\_ext\_0} = T_i - 2$  [°C] "*valeur initiale, température des murs légèrement moins élevée que la température intérieure* "

373:  $C_{wall\_ext} = A_{hex\_mean} * C_{wall} * \phi_{wall}$

374:

375:  $T_{wall\_mean} = \text{integral}(T_{wall\_ext}, \tau, \tau_1, \tau_2, DELTA\tau) / (\tau_2 - \tau_1)$

376:

377: "**!par le sol, échange entre l'air intérieur de la couveuse et sol @ T = cste = T moyenne au Togo**"

378:

379: "*Sol = Contreplaqué + planche de frigolite (30 ou 50 mm) + contreplaqué* "

380:  $ground\_type = 3$  "*Wall\_type + 2* "

381:  $U_{gr} = \text{interpolate1}('Data\_proc', 'U_{wall}', 'Walltype', Walltype = ground\_type)$

382:  $C_{gr} = \text{interpolate1}('Data\_proc', 'C_{wall}', 'Walltype', Walltype = ground\_type)$

383:  $\theta_{gr} = \text{interpolate1}('Data\_proc', '\theta_{wall}', 'Walltype', Walltype = ground\_type)$

384:  $\phi_{gr} = \text{interpolate1}('Data\_proc', '\phi_{wall}', 'Walltype', Walltype = ground\_type)$

385:

386:  $AU_{ground} = A_{ground} * U_{gr}$

387:  $A_{ground} = surface_{in}$

388:  $R_{ground} = 1/AU_{ground}$

389:  $R_{a\_in\_gr} = 1/(h_{air\_in} * A_{ground})$

390:

391:  $T_{gr} = 26$  "*température moyenne de l'air au cours de l'année* "

392:  $Q_{dot\_ground\_out} = 1/(R_{ground} * (1 - \theta_{gr})) * (T_{ground} - T_{gr})$  "*pas de résistance de l'air à intégrer car plaqué contre le sol* "

393:  $Q_{dot\_ground\_in} = 1/(R_{ground} * \theta_{gr} + R_{a\_in\_gr}) * (T_{in} - T_{ground})$  "*positif si T<sub>in</sub> se décharge vers la paroi du sol* "

394:  $Q_{dot\_ground\_in} - Q_{dot\_ground\_out} = dU/d\tau_{ground}$

395:

396:  $DELTAU_{ground} = \text{integral}(dU/d\tau_{ground}, \tau, \tau_1, \tau_2, DELTA\tau)$

397:  $DELTAU_{ground} = C_{ground} * (T_{ground} - T_{ground\_0})$

398:  $C_{ground} = A_{ground} * C_{gr} * \phi_{gr}$

399:  $T_{ground\_0} = T_i - 3$  [°C] "*T° initiale, plus faible que T<sub>in</sub>* "

400:

401: "**! Echange de chaleur par infiltration** "

402:

403:  $Q_{dot\_inf\_in} = V_{dot\_in} * cp_a * \rho_a * (T_{in} + T_{kelvin})$

404:  $Q_{dot\_inf\_out} = V_{dot\_out} * cp_a * \rho_a * (T_{out} + T_{kelvin})$

405:  $\Delta Q_{dot\_inf} = Q_{dot\_inf\_in} - Q_{dot\_inf\_out}$

406:

407: "**! Fenêtre = vitre de la couveuse**"

408:  $Q_{dot\_window} = S_{window} * U_{window} * (T_{in} - T_{out})$

409:

410: "**! Bilan sensible sur l'intérieur de la couveuse**"

411:  $Q_{dot\_eggs} + Q_{dot\_fans} + Q_{dot\_heater} - Q_{dot\_ground\_in} - \Delta Q_{dot\_inf} - Q_{dot\_window} - Q_{dot\_in} = dU/d\tau_{in}$

412:  $DELTAU_{in} = \text{integral}(dU/d\tau_{in}, \tau, \tau_1, \tau_2, DELTA\tau)$

413:  $DELTAU_{in} = C_{in} * (T_{in} - T_{in\_0})$

414:  $T_{in\_0} = T_i$  "*Température initiale dans la pièce*"

415:

416:  $Q_{dot\_on\_off\_i} = \text{trunc}(N_{res\_max}/2)$  "*valeur initiale du chauffage = moitié de la capacité max* "

417:  $Q_{dot\_on\_off} = \text{if}(\tau, \tau_1 + DELTA\tau, Q_{dot\_on\_off\_i}, Q_{dot\_on\_off\_i}, heater\_on\_off(T_{in\_n}, \tau, DELTA\tau)$



```

,N_res_max)) " variable de la chauffe de la couveuse = nombre de paliers activés"
418: Q_dot_heater = Q_dot_on_off * Q_dot_heater_n
419:
420:
421: "! Capacité de l'air intérieur + Masse interne : stockage dans l'encombrement"
422:
423: C_in = C_in_air + C_in_mass
424: C_in_air = volume_in * rho_a * cp_a "capacité de l'air intérieur "
425: C_in_mass = m_int * cp_int "capacité lié à l'encombrement du système de retournement des oeufs "
426: cp_int = 887 [J/kg-K] " chaleur calorifique de l'alu"
427: m_int = 10 [kg] " poids du système de retournement des oeufs "
428:
429: "Chaleur dégagée par les ventilateurs et électronique "
430: Q_dot_fans = 10 [W]
431:
432: "!Simulations"
433:
434: simu_type$ = 'Jui_dim' { 'Mars_dim_bis' } { 'Jui_dim' } { 'Load_data' } "Load_data = toute l'année"
435:
436: tau_h_1=24*0+ 24*(31+28)*1 + 24*(31+30+31+30)*1 [h] "*0 si on veut commencer début janvier" " 23 janvier, 13 mars, 4 juillet "
437:
438: tau_h_2 = tau_h_1 + 24*1 [h] "x jours de simulation"
439: DELTAtau_h = 5*(1/60) [h] " pas de temps = 5 minutes"
440: tau-tau_1 = (tau_h-tau_h_1)*convert('h','s')
441: tau_1 = tau_h_1*convert('h','s')
442: tau_2 = tau_h_2*convert('h','s')
443: DELTAtau = DELTAtau_h*convert('h','s')
444: tau_jour = floor(tau_h/24)
445:
446: tau_jour_incub = if(tau,tau_1+DELTAtau, 0, 0, integralvalue(tau-DELTAtau,'tau_jour') - integralvalue(DELTAtau,'tau_jour') )
447:
448:
449: "! Humidité relative"
450:
451: " humidité extérieure "
452:
453: w_air_ex = humrat(AirH2O, T = T_out, R = RH_out , P = P_a)
454: w_air_ex_g = w_air_ex * 1000
455:
456: " eau venant des poussins"
457: m_water_egg = 0.4E-3 / (24 * 3600) * n_eggs "kg/s = 0.4 g/oeuf/jour"
458:
459: "eau extraite par le silica gel"
460: n_sachets = 15 " varie en fonction des simulations"
461: m_eau_silica_gel = n_sachets * 2 /1000 / (12*3600) " x sachets qui absorbent 2g en 12h * 3600 s/h --> Et on les change tous les 1-2 jours "
462: f_gel = round(interpolate1(Simu_type$,f_gel"_bis",t,t=tau_h) ) " f_gel = changement tous les jours, f_gel_bis = changement tout les deux jours "
463: silica_on_off = 1 " utilisation de silica gel ou non "
464:
465: "bilan de masse d'eau interne"
466:
467: v_a = volume(AirH2O,T=T_out,w=w_air_ex,P=P_a) " volume massique de l'air extérieur "
468:
469: m_water_egg + (w_air_ex - w_air_in) * V_dot_in /v_a - m_eau_silica_gel * f_gel * silica_on_off = dm_eau\dtau_in "kg d'eau/s"
470: DELTA_m_eau_in = integral(dm_eau\dtau_in,tau,tau_1,tau_2, DELTAtau)
471: DELTA_m_eau_in = m_air_in*(w_air_in-w_air_in_0)
472: w_air_in_0 = humrat(AirH2O, T = T_in, R = RH_i , P = P_a)

```

```

473: RH_i = 0.45 "humidité relative initiale"
474: m_air_in = volume_in * rho_a
475: m_eau_in = w_air_in * m_air_in
476:
477: "humidité intérieure"
478: RH_in = relhum(AirH2O, T = T_in, w = w_air_in, P = P_a)
479: RH_in_% = RH_in * 100
480:
481: " Valeurs moyennes d'humidité "
482:
483: RH_in_mean = integral(RH_in,tau,tau_1,tau_2,DELTAtau)/(tau_2-tau_1)
484: RH_out_mean = integral(RH_out,tau,tau_1,tau_2,DELTAtau)/(tau_2-tau_1)
485: w_air_ex_mean = integral(w_air_ex_g,tau,tau_1,tau_2,DELTAtau)/(tau_2-tau_1)
486:
487:
488: "! Résultats"
489:
490: "eau retirée"
491: m_eau_out = integral(m_eau_silica_gel * f_gel,tau,tau_1,tau_2,DELTAtau)
492:
493: "données de chauffage"
494: Q_dot_heating_kWh= integral(Q_dot_heater,tau,tau_1,tau_2,DELTAtau)*convert('J','kWh')
495: Q_dot_heating_W_mean = Q_dot_heating_kWh/(tau_h_2-tau_h_1) * convert('kW','W') " énergie totale / nb d'heures ! kWh
/h = kW moyen"
496: tau_utilisation_chauffage = Q_dot_heating_kWh*convert('kWh', 'Wh') / (N_res_max*Q_dot_heater_n) / (tau_h_2 - tau_h_1) "
h/h "
497:
498: Q_dot_in_kWh= integral(Q_dot_in,tau,tau_1,tau_2,DELTAtau)*convert('J','kWh')
499: Q_dot_in_W_mean = Q_dot_in_kWh/(tau_h_2-tau_h_1) * convert('kW','W')
500:
501: Q_dot_ground_in_kWh= integral(Q_dot_ground_in,tau,tau_1,tau_2,DELTAtau)*convert('J','kWh')
502: Q_dot_ground_in_W_mean = Q_dot_ground_in_kWh/(tau_h_2-tau_h_1) * convert('kW','W')
503:
504: Q_dot_inf_kWh= integral(Delta_Q_dot_inf,tau,tau_1,tau_2,DELTAtau)*convert('J','kWh')
505: Q_dot_inf_W_mean = Q_dot_inf_kWh/(tau_h_2-tau_h_1) * convert('kW','W')
506:
507:
508: " températures moyennes "
509: T_in_mean = integral(T_in,tau,tau_1,tau_2,DELTAtau)/(tau_2-tau_1)
510: T_out_mean = integral(T_out,tau,tau_1,tau_2,DELTAtau)/(tau_2-tau_1)
511:
512:
513: "écart de température - pour apprécier la qualité d'une simulation : surchauffe? Sous-refroidissements? "
514: T_up_7 = if(tau,tau_1+DELTA_TAU,0,0,t_max_7(T_in_n,tau,DELTAtau))
515: T_down_7 = if(tau,tau_1+DELTA_TAU,0,0,t_min_7(T_in_n,tau,DELTAtau))
516: T_up_max = if(tau,tau_1+DELTA_TAU,0,0,t_warning_39_4(T_in_n,tau,DELTAtau))
517: T_down_max = if(tau,tau_1+DELTA_TAU,0,0,t_warning_35_6(T_in_n,tau,DELTAtau))
518:
519: T_up_death = if(tau,tau_1+DELTA_TAU,0,0,t_u_death(T_in_n,tau,DELTAtau))
520: T_down_death = if(tau,tau_1+DELTA_TAU,0,0,t_d_death(T_in_n,tau,DELTAtau))
521:
522: T_up_warning = if(tau,tau_1+DELTA_TAU,0,0,t_u_warning(T_in_n,tau,DELTAtau))
523: T_down_warning = if(tau,tau_1+DELTA_TAU,0,0,t_d_warning(T_in_n,tau,DELTAtau))
524:
525: T_up_alert = if(tau,tau_1+DELTA_TAU,0,0,t_u_alert(T_in_n,tau,DELTAtau)) " 0 ou 1 "
526: T_down_alert = if(tau,tau_1+DELTA_TAU,0,0,t_d_alert(T_in_n,tau,DELTAtau))
527:
528:
529: $IntegralTable tau:DELTAtau, tau_h,tau_jour,tau_jour_incub,x,Count_fans,Q_dot_fans,T_out,T_in, T_wall_ext,T_PCM,
dU\dtau_in, T_ground, Q_dot_on_off, Q_dot_ground_in, Q_dot_in,Delta_Q_dot_inf,Q_dot_window,Q_dot_heater,T_up_7,

```

T\_down\_7, T\_up\_max, T\_down\_max, T\_up\_death, T\_down\_death, T\_up\_warning, T\_down\_warning, T\_up\_alert,  
 T\_down\_alert, RH\_out, RH\_in, Q\_dot\_out, tau\_utilisation\_chauffage, T\_m\_in, Q\_dot\_eggs, Q\_dot\_inf\_in, Q\_dot\_inf\_out,  
 f\_gel, m\_eau\_in, w\_air\_ex, w\_air\_in, n\_sachets, Q\_dot\_m\_in\_c, RH\_in\_%, w\_air\_ex\_g, T\_gr, check, check\_1

530:

531:

532: "."

## MODELISATION COUVEUSE - TFE 2020-2021

*Auteure : Juliette Dembour*

*Dernière modification : le 08-06-2021*

### Définition de fonctions utilisées dans le corps du code

*Fonction de chauffe, par palier*

*Nombre de paliers de chauffe : de 0 à  $N_{res,max}$*

*Utilisation de la valeur précédente de  $T_{in}$ , nécessaire pour la convergence*

*Ajustement du chauffage si écarte de 0,5 par rapport à  $T_{in,n}$  = Température de consigne*

*Fonctions de détection de dépassement des limites de température*

*Nombre de périodes de temps pendant lesquelles la 1ère limite sup (0,7°C) est dépassée*

*Fonction de heater, de temps pendant lesquelles la 1ère limite inf (0,7°C) est dépassée*

$T_{in} := \text{INTEGRALVALUE} (\tau - \Delta\tau, T_{in})$

$\text{heater}_{on,off,0} := \text{INTEGRALVALUE} (\tau - \Delta\tau, Q_{dot,on,off})$

$\text{heater}_{on,off} := \text{heater}_{on,off,0}$

If  $((T_{in} > T_{in,n} + 0.5) \text{ and } (\text{heater}_{on,off,0} > 0))$  Then

$\text{heater}_{on,off} := \text{heater}_{on,off,0} - 1$

If  $((T_{in} < T_{in,n} - 0.5) \text{ and } (\text{heater}_{on,off,0} < N_{res,max}))$  Then

$\text{heater}_{on,off} := \text{heater}_{on,off,0} + 1$

If  $(\text{heater}_{on,off} > N_{res,max})$  Then

$\text{heater}_{on,off} := N_{res,max}$

If  $(\text{heater}_{on,off} < 0.00001)$  Then

$\text{heater}_{on,off} := 0$

End **heater**<sub>on,off</sub>

*Alerte si la limite inférieure absolue est dépassée*

*Alerte si la limite supérieure absolue est dépassée*

Function **t**<sub>max,7</sub> ( $T_{in,n}, \tau, \Delta\tau$ )

$$T_{in} := \text{INTEGRALVALUE} (\tau - \Delta\tau, T_{in})$$

$$t_{up,0} := \text{INTEGRALVALUE} (\tau - \Delta\tau, T_{up,7})$$

$$t_{max,7} := t_{up,0}$$

If ( $T_{in} > T_{in,n} + 0.7$ ) Then

$$t_{max,7} := t_{up,0} + 1$$

Else

$$t_{max,7} := 0$$

EndIf

End  $t_{max,7}$

*Mort des oeufs si dépassement de la limite pendant 2h*

Function  $t_{min,7}(T_{in,n}, \tau, \Delta\tau)$

$$T_{in} := \text{INTEGRALVALUE} (\tau - \Delta\tau, T_{in})$$

$$t_{down,0} := \text{INTEGRALVALUE} (\tau - \Delta\tau, T_{down,7})$$

$$t_{min,7} := t_{down,0}$$

If ( $T_{in} < T_{in,n} - 0.7$ ) Then

$$t_{min,7} := t_{down,0} + 1$$

Else

$$t_{min,7} := 0$$

EndIf

End  $t_{min,7}$

*2 \* 3600/DELTAtau = nombre de périodes de temps dans 2h*

Function  $t_{warning,35,6}(T_{in,n}, \tau, \Delta\tau)$

$$T_{in} := \text{INTEGRALVALUE} (\tau - \Delta\tau, T_{in})$$

$$t_{down,0} := \text{INTEGRALVALUE} (\tau - \Delta\tau, T_{down,max})$$

$$t_{warning,35,6} := t_{down,0}$$

If ( $T_{in} < 35.6$ ) Then

$$t_{warning,35,6} := t_{down,0} + 1$$

Else

$$t_{warning,35,6} := 0$$

Endif

End  $t_{\text{warning},35,6}$

*Mort des oeufs si dépassement de la limite pendant 2h*

Function  $t_{\text{warning},39,4}(T_{\text{in},n}, \tau, \Delta\tau)$

$T_{\text{in}} := \text{INTEGRALVALUE}(\tau - \Delta\tau, T_{\text{in}})$

$t_{\text{up},0} := \text{INTEGRALVALUE}(\tau - \Delta\tau, T_{\text{up},\text{max}})$

$t_{\text{warning},39,4} := t_{\text{up},0}$

If  $(T_{\text{in}} > 39.4)$  Then

$t_{\text{warning},39,4} := t_{\text{up},0} + 1$

Else

$t_{\text{warning},39,4} := 0$

Endif

End  $t_{\text{warning},39,4}$

*2 \* 3600/DELTAtau = nombre de périodes de temps dans 2h*

Function  $t_{\text{d},\text{death}}(T_{\text{in},n}, \tau, \Delta\tau)$  *(Fonction de périodes alerte de dépassement pendant 1h)*

$T_{\text{in}} := \text{INTEGRALVALUE}(\tau - \Delta\tau, T_{\text{in}})$

$t_{\text{down},7,0} := \text{INTEGRALVALUE}(\tau - \Delta\tau, T_{\text{down},7})$

$t_{\text{down},\text{death}} := \text{INTEGRALVALUE}(\tau - \Delta\tau, T_{\text{down},\text{death}})$

$t_{\text{d},\text{death}} := t_{\text{down},\text{death}}$

If  $\left[ t_{\text{down},7,0} = 2 \cdot \frac{3600}{\Delta\tau} \right]$  Then

$t_{\text{d},\text{death}} := t_{\text{down},\text{death}} + 1$

End  $t_{\text{d},\text{death}}$

Function  $t_{\text{u},\text{death}}(T_{\text{in},n}, \tau, \Delta\tau)$  *(Fonction de périodes alerte de dépassement pendant 1h)*

$T_{\text{in}} := \text{INTEGRALVALUE}(\tau - \Delta\tau, T_{\text{in}})$

$t_{\text{up},7,0} := \text{INTEGRALVALUE}(\tau - \Delta\tau, T_{\text{up},7})$

$t_{\text{up},\text{death}} := \text{INTEGRALVALUE}(\tau - \Delta\tau, T_{\text{up},\text{death}})$

$t_{\text{u},\text{death}} := t_{\text{up},\text{death}}$

If  $\left[ t_{\text{up},7,0} = 2 \cdot \frac{3600}{\Delta\tau} \right]$  Then

$$t_{u,death} := t_{up,death} + 1$$

End  $t_{u,death}$

*0 ou 1, 1 si dépassement des limites pendant 1h (acceptable mais attention)*

Function  $t_{d,warning}(T_{in,n}, \tau, \Delta\tau)$

$$T_{down,alert,1} := \text{INTEGRALVALUE}(\tau - 2 \cdot \Delta\tau, T_{down,alert})$$

$$T_{down,alert,0} := \text{INTEGRALVALUE}(\tau - \Delta\tau, T_{down,alert})$$

$$T_{down,warning} := \text{INTEGRALVALUE}(\tau - \Delta\tau, T_{down,warning})$$

$$t_{d,warning} := T_{down,warning}$$

If (( $T_{down,alert,0} = 1$ ) and ( $T_{down,alert,1} = 0$ )) Then

$$t_{d,warning} := T_{down,warning} + 1$$

End  $t_{d,warning}$

*1 \* 3600/DELTAtau = nombre de périodes de temps dans 1h*

Function  $t_{u,warning}(T_{in,n}, \tau, \Delta\tau)$  *si dépassement des limites pendant 1h (acceptable mais attention)*

$$T_{up,alert,1} := \text{INTEGRALVALUE}(\tau - 2 \cdot \Delta\tau, T_{up,alert})$$

$$T_{up,alert,0} := \text{INTEGRALVALUE}(\tau - \Delta\tau, T_{up,alert})$$

$$T_{up,warning} := \text{INTEGRALVALUE}(\tau - \Delta\tau, T_{up,warning})$$

$$t_{u,warning} := T_{up,warning}$$

If (( $T_{up,alert,0} = 1$ ) and ( $T_{up,alert,1} = 0$ )) Then

$$t_{u,warning} := T_{up,warning} + 1$$

End  $t_{u,warning}$

*1 \* 3600/DELTAtau = nombre de périodes de temps dans 1h*

**Caisson**

*Dimensions*

*Géométrie selon les dimensions réelles considérées*

*Ces trois dimensions sont les dimensions intérieures*

Function  $t_{d,alert}(T_{in,n}, \tau, \Delta\tau)$

$$T_{in} := \text{INTEGRALVALUE}(\tau - \Delta\tau, T_{in})$$

$$t_{down,7,0} := \text{INTEGRALVALUE}(\tau - \Delta\tau, T_{down,7})$$

$$t_{d,alert} := 0$$

$$\text{If } \left[ t_{down,7,0} > \text{Round} \left[ 1 \cdot \left[ \frac{3600 - \Delta\tau}{\Delta\tau} \right] \right] \right] \text{ Then}$$

$$t_{d,alert} := 1$$

End  $t_{d,alert}$

[m]

1220 mm - épaisseur frigolite

[m]

[m]

[m<sup>2</sup>]

[m<sup>3</sup>]

*Pas de fenêtre considérée dans un premier temps, en étudiant l'impact pour le produit fini*

### Fenêtre?

Fonction surface des murs latéraux et du toit, tous composés des mêmes matériaux

$$T_{in} := \text{INTEGRALVALUE} (\tau - \Delta\tau, T_{in})$$

$$t_{up,7,0} := \text{INTEGRALVALUE} (\tau - \Delta\tau, T_{up,7})$$

$$t_{u,alert} := 0$$

$$\text{If } \left[ t_{up,7,0} > \text{Round} \left[ 1 \cdot \left[ \frac{3600 - \Delta\tau}{\Delta\tau} \right] \right] \right] \text{ Then}$$

$$t_{u,alert} := 1$$

End  $t_{u,alert}$

$$h = 1.22 \text{ [m]} - t_{frig}$$

$$\text{Long} = 1.006 \text{ [m]} - 2 \cdot t_{frig}$$

$$\text{Larg} = 0.697 \text{ [m]} - t_{frig}$$

$$\text{surface}_{in} = \text{Long} \cdot \text{Larg}$$

$$\text{volume}_{in} = h \cdot \text{surface}_{in}$$

$$h_{window} = 0 \cdot 0.7 \text{ [m]}$$

$$l_{window} = 0.3 \text{ [m]}$$

$$S_{window} = h_{window} \cdot l_{window}$$

$$U_{window} = 3 \text{ [W/m}^2\text{-K]}$$

$$A_{\text{hex},in} = \text{surface}_{in} + 2 \cdot h \cdot (\text{Long} + \text{Larg}) - S_{\text{window}} \quad S_{\text{window}} = 0$$

$$A_{\text{hex},out} = (\text{Long} + e_{\text{mur}}) \cdot (\text{Larg} + e_{\text{mur}}) + 2 \cdot (h + e_{\text{mur}}) \cdot (\text{Long} + e_{\text{mur}} + \text{Larg} + e_{\text{mur}}) - S_{\text{window}}$$

$$S_{\text{window}} = 0$$

$$A_{\text{hex},mean} = \frac{A_{\text{hex},in} + A_{\text{hex},out}}{2}$$

*properties of isolation materials*

$$k_{\text{frig}} = 0.05 \quad [\text{W/m-K}] \quad \text{valeur de la frigolite de chez Hubo}$$

$$k_{\text{btplx}} = 0.14 \quad [\text{W/m-K}] \quad \text{moyenne de ce qu'on trouve sur Internet - hypothèse}$$

### Paramètres

*Nombre d'oeufs*

$$n_{\text{eggs}} = n_{\text{plates}} \cdot n_{\text{egg,plate}}$$

$$n_{\text{egg,plate}} = n_{\text{egg,row}}^2 \quad \text{plateaux carrés}$$

$$n_{\text{egg,row}} = 7 \quad \text{Nombre d'oeufs par rangées}$$

$$n_{\text{plates}} = 3 \quad \text{nombre de plateaux}$$

*Production de chaleur des oeufs incubés*

$$\dot{Q}_{\text{egg,mW}} = \text{Interpolate1} ('Q_{\text{dot,heat,egg}}', 't', 'Q_{\text{dot,evapo}}', 't' = \tau_{\text{jour,incub}}) + \text{Interpolate1} ('Q_{\text{dot,heat,egg}}', 't', 'Q_{\text{dot,heat}}', 't' = \tau_{\text{jour,incub}})$$

*19 mW en tout temps (via évapo de l'eau), augmentation de la chaleur pendant l'incubation, jusqu'à 130 mW à la fin*

$$\dot{Q}_{\text{egg}} = \frac{\dot{Q}_{\text{egg,mW}}}{1000}$$

$$\dot{Q}_{\text{eggs}} = \dot{Q}_{\text{egg}} \cdot n_{\text{eggs}}$$

$$t_{\text{btplx}} = 0.018 \quad \text{épaisseur du betonplex utilisé}$$

$$\dot{Q}_{\text{heater,n}} = 10 \quad [\text{W}] \quad \text{Valeur d'un palier de chauffe = la chauffe est varié par pas de 10 W}$$

### Apport d'air frais

*procédure orifice*

$$m = 0$$

$$\text{ACH} = 0.3 \quad \text{Air Change per Hour, hypothèse}$$

$$\dot{V}_n = \text{ACH} \cdot \text{volume}_{in} \quad \text{débit entrant dans la couveuse par infiltration}$$

$$\dot{V}_{in} = \dot{V}_n \cdot \left| 0.000277778 \cdot \frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{m}^3/\text{h}} \right|$$



*volume s'infiltrant dans la couveuse [m<sup>3</sup>/s]*

$$\dot{V}_{out} = \dot{V}_{in}$$

**Données (climatiques) TMY, depuis [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/fr/#TMY](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/fr/#TMY)**

*Simu\_type\$ est le mois simulé : janvier, mars, juillet*

$$T_{out} = \text{Interpolate1}(\text{Simu\_type}\$, 'T', 'T_{out}', 'T' = \tau_h) \quad \text{Température extérieure}$$

$$V_{air,out} = \text{Interpolate1}(\text{Simu\_type}\$, 'T', 'v_{wind}', 'T' = \tau_h) \quad \text{vitesse du vent - air extérieur}$$

$$RH_{out} = \text{Interpolate1}(\text{Simu\_type}\$, 'T', 'RH', 'T' = \tau_h) \quad \text{taux d'humidité extérieure}$$

$$T_{kelvin} = 273.15 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$T_i = 37.5 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad \text{température initiale dans la couveuse}$$

$$T_{in,n} = 37.5 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

*Properties of air*

$$P_a = 101325 \quad [\text{Pa}] \quad 1 \text{ atm}$$

$$\rho_a = \rho(\text{Air}_{ha}, T = T_{out}, P = P_a)$$

$$c_{p_a} = \text{Cp}(\text{Air}_{ha}, T = T_{out}, P = P_a)$$

$$k_a = \text{k}(\text{Air}_{ha}, T = T_{out}, P = P_a)$$

$$\mu_a = \text{Visc}(\text{Air}_{ha}, T = T_{out}, P = P_a)$$

*air side heat transfer coefficient intérieure et extérieur*

$$h_{air,out} = 5.7 + 3.8 \cdot V_{air,out} \quad \text{hypothèse depuis ASHRAE handbook}$$

$$h_{air,out,mean} = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_2} (h_{air,out}) d\tau}{\tau_2 - \tau_1}$$

$$h_{air,in} = 10 \quad [\text{W/m}^2\text{-K}] \quad \text{hypothèse}$$

$$R_{a,out} = \frac{1}{h_{air,out} \cdot A_{hex,out}} \quad \text{résistance de l'air}$$

$$R_{a,in} = \frac{1}{h_{air,in} \cdot A_{hex,in}}$$

**Code PCM**

*le commenter entièrement pour simuler sans PCM*

*HYPOTHESE : PCM placé dans les parois de la couveuse, entre deux couches de frigolite*

$$t_{frig,in} = 0.01 \quad \text{épaisseur minimale pour pouvoir placer le PCM à l'intérieur des parois - HYPOTHESE}$$

$$t_{frig} = t_{frig,in} + t_{frig,out}$$

$$R_{\text{frig,in}} = \frac{t_{\text{frig,in}}}{A_{\text{hex,in}} \cdot k_{\text{frig}}}$$

$$R_{\text{frig,out}} = \frac{t_{\text{frig,out}}}{A_{\text{hex,out}} \cdot k_{\text{frig}}}$$

$$R_{\text{btplx,out}} = \frac{t_{\text{btplx}}}{A_{\text{hex,out}} \cdot k_{\text{btplx}}}$$

$$\text{PCM}_{\text{type}\$} = \text{'PCMcurve}_{35,\text{HC}} \text{' } \text{'PCMcurve}_{35}' \quad \text{2 types différents peuvent être simulés}$$

$$e_{\text{PCM}} = 0.007 \quad 0,005 \quad \text{choisir selon la configuration à simuler}$$

$$e_{\text{mur}} = e_{\text{PCM}} + t_{\text{frig}} + t_{\text{btplx}}$$

$$V_{\text{PCM}} = A_{\text{hex,mean}} \cdot e_{\text{PCM}} \quad \text{volume de PCM}$$

$$M_{\text{PCM}} = V_{\text{PCM}} \cdot \rho_{\text{PCM},0} \quad \text{masse de PCM}$$

$$\rho_{\text{PCM},0} = \text{Interpolate1}(\text{PCM}_{\text{type}\$}, \text{'T}_{\text{mat}}', \text{'rho'}, \text{'T}_{\text{mat}} = T_{\text{pcm},0})$$

$$\rho_{\text{PCM}} = \text{Interpolate1}(\text{PCM}_{\text{type}\$}, \text{'T}_{\text{mat}}', \text{'rho'}, \text{'T}_{\text{mat}} = T_{\text{pcm}})$$

*la masse volumique varie légèrement selon la phase*

*PCM side heat transfer coefficient - BOTH SIDES*

$$R_{\text{PCM}} = \frac{\frac{e_{\text{PCM}}}{2}}{k_{\text{PCM}} \cdot A_{\text{hex,mean}}}$$

$$k_{\text{PCM}} = 0.2 \cdot c_{\text{natural}}$$

$$c_{\text{natural}} = 2 \quad \text{pour modéliser les transferts de chaleur au sein du PCM par convection naturelle}$$

$$\frac{1}{AU_{\text{in}}} = R_{\text{frig,in}} + R_{\text{a,in}} + R_{\text{PCM}}$$

$$\frac{1}{AU_{\text{out}}} = R_{\text{frig,out}} + R_{\text{btplx,out}} + R_{\text{a,out}} + R_{\text{PCM}}$$

$$AU_{\text{in,mean}} = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_2} (AU_{\text{in}}) d\tau}{\tau_2 - \tau_1}$$

$$AU_{\text{out,mean}} = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_2} (AU_{\text{out}}) d\tau}{\tau_2 - \tau_1}$$

$$\dot{Q}_{\text{in}} = AU_{\text{in}} \cdot (T_{\text{in}} - T_{\text{pcm}}) \quad \text{positif si } T_{\text{in}} > T_{\text{PCM}} = \text{charge du PCM}$$

$$\dot{Q}_{\text{out}} = AU_{\text{out}} \cdot (T_{\text{pcm}} - T_{\text{out}}) \quad \text{positif si } T_{\text{PCM}} > T_{\text{out}} = \text{décharge du PCM}$$

*Bilan sur le PCM*

$$dU_{\text{dtau}} = \dot{Q}_{\text{in}} - \dot{Q}_{\text{out}} \quad \text{positif si charge du PCM}$$

$$\Delta u = \int_{\tau_1}^{\tau_2} (dU d\tau) d\tau$$

$$\Delta u = M_{PCM} \cdot (h_{PCM} - h_{PCM,0}) \quad dh=du+Pdv+vdP: P \text{ constant et } Pdv \text{ très faible} \Rightarrow dh=du$$

$$h_{PCM} = \text{Interpolate1} (PCM_{type\$}, 'T_{mat}', 'h_{PCM}', 'T_{mat} = T_{pcm}')$$

$$h_{PCM,0} = \text{Interpolate1} (PCM_{type\$}, 'T_{mat}', 'h_{PCM}', 'T_{mat} = T_{pcm,0}')$$

$$T_{pcm,0} = 35 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad \text{température initiale du PCM}$$

$$T_{PCM,mean} = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_2} (T_{pcm}) d\tau}{\tau_2 - \tau_1}$$

$$N_{res,max} = 6 \quad \text{nombre de paliers de chauffe - 6 avec 50 mm de frigolite et 9 avec 30 mm de frigolite}$$

$$t_{frig} = 0.05 \quad \text{épaisseur totale de frigolite, choix justifié dans le TFE}$$

### Code sans PCM - Echanges par conduction

*le commenter entièrement pour simuler avec PCM*

*par les parois latérales et le plafond de la couveuse*

*Matériaux caisson*

$$Wall_{type} = 1 \quad \text{choisir, 1 - 50 ou 2 - 30}$$

$$e_{mur} = t_{btplx} + t_{frig} \quad \text{une seule épaisseur de btplx}$$

$$U_{wall} = \text{Interpolate1} ('Data_{proc}', 'walltype', 'U_{wall}', 'walltype = Wall_{type}')$$

$$C_{wall} = \text{Interpolate1} ('Data_{proc}', 'walltype', 'C_{wall}', 'walltype = Wall_{type}')$$

$$\theta_{wall} = \text{Interpolate1} ('Data_{proc}', 'walltype', 'theta_{wall}', 'walltype = Wall_{type}')$$

$$\phi_{wall} = \text{Interpolate1} ('Data_{proc}', 'walltype', 'phi_{wall}', 'walltype = Wall_{type}')$$

$$AU_{wall,ext} = A_{hex,mean} \cdot U_{wall}$$

$$R_{wall,ext} = \frac{1}{AU_{wall,ext}}$$

$$\dot{Q}_{out} = \left[ \frac{1}{R_{wall,ext} \cdot (1 - \theta_{wall}) + R_{a,out}} \right] \cdot (T_{wall,ext} - T_{out}) \quad R_{a,out} \text{ modélise la résistance de l'air}$$

*positif si le mur se refroidit vers l'air extérieure*

$$\dot{Q}_{in} = \left[ \frac{1}{R_{wall,ext} \cdot \theta_{wall} + R_{a,in}} \right] \cdot (T_{in} - T_{wall,ext}) \quad R_{a,in} \text{ modélise la résistance de l'air}$$

*positif si l'air intérieur se décharge vers le mur (toujours le cas)*

$$\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} = dU/d\tau_{wall,ext}$$

$$\Delta U_{\text{wall,ext}} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} (dU/d\tau_{\text{wall,ext}}) d\tau$$

$$\Delta U_{\text{wall,ext}} = C_{\text{wall,ext}} \cdot (T_{\text{wall,ext}} - T_{\text{wall,ext},0})$$

$$T_{\text{wall,ext},0} = T_i - 2 \text{ [}^\circ\text{C]} \text{ valeur initiale, température des murs légèrement moins élevée que la température intérieure}$$

$$C_{\text{wall,ext}} = A_{\text{hex,mean}} \cdot C_{\text{wall}} \cdot \phi_{\text{wall}}$$

$$T_{\text{wall,mean}} = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_2} (T_{\text{wall,ext}}) d\tau}{\tau_2 - \tau_1}$$

**par le sol, échange entre l'air intérieur de la couveuse et sol @ T = cste = T moyenne au Togo**

*Sol = Contreplaqué + planche de frigolite (30 ou 50 mm) + contreplaqué*

$$\text{ground}_{\text{type}} = 3 \text{ Wall}_{\text{type}} + 2$$

$$U_{\text{gr}} = \text{Interpolate1} ('Data_{\text{proc}}', 'wall_{\text{type}}', 'U_{\text{wall}}', 'wall_{\text{type}}' = \text{ground}_{\text{type}})$$

$$C_{\text{gr}} = \text{Interpolate1} ('Data_{\text{proc}}', 'wall_{\text{type}}', 'C_{\text{wall}}', 'wall_{\text{type}}' = \text{ground}_{\text{type}})$$

$$\theta_{\text{gr}} = \text{Interpolate1} ('Data_{\text{proc}}', 'wall_{\text{type}}', 'theta_{\text{wall}}', 'wall_{\text{type}}' = \text{ground}_{\text{type}})$$

$$\phi_{\text{gr}} = \text{Interpolate1} ('Data_{\text{proc}}', 'wall_{\text{type}}', 'phi_{\text{wall}}', 'wall_{\text{type}}' = \text{ground}_{\text{type}})$$

$$AU_{\text{ground}} = A_{\text{ground}} \cdot U_{\text{gr}}$$

$$A_{\text{ground}} = \text{surface}_{\text{in}}$$

$$R_{\text{ground}} = \frac{1}{AU_{\text{ground}}}$$

$$R_{\text{a,in,gr}} = \frac{1}{h_{\text{air,in}} \cdot A_{\text{ground}}}$$

$$T_{\text{gr}} = 26 \text{ température moyenne de l'air au cours de l'année}$$

$$\dot{Q}_{\text{ground,out}} = \frac{1}{R_{\text{ground}} \cdot (1 - \theta_{\text{gr}})} \cdot (T_{\text{ground}} - T_{\text{gr}}) \text{ pas de résistance de l'air à intégrer car plaqué contre le sol}$$

$$\dot{Q}_{\text{ground,in}} = \left[ \frac{1}{R_{\text{ground}} \cdot \theta_{\text{gr}} + R_{\text{a,in,gr}}} \right] \cdot (T_{\text{in}} - T_{\text{ground}}) \text{ positif si } T_{\text{in}} \text{ se décharge vers la paroi du sol}$$

$$\dot{Q}_{\text{ground,in}} - \dot{Q}_{\text{ground,out}} = dU/d\tau_{\text{ground}}$$

$$\Delta U_{\text{ground}} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} (dU/d\tau_{\text{ground}}) d\tau$$

$$\Delta U_{\text{ground}} = C_{\text{ground}} \cdot (T_{\text{ground}} - T_{\text{ground},0})$$

$$C_{\text{ground}} = A_{\text{ground}} \cdot C_{\text{gr}} \cdot \phi_{\text{gr}}$$

$$T_{\text{ground},0} = T_i - 3 \text{ [}^\circ\text{C]} \text{ } T^\circ \text{ initiale, plus faible que } T_{\text{in}}$$

**Echange de chaleur par infiltration**

$$\dot{Q}_{inf,in} = \dot{V}_{in} \cdot cp_a \cdot \rho_a \cdot (T_{in} + T_{kelvin})$$

$$\dot{Q}_{inf,out} = \dot{V}_{out} \cdot cp_a \cdot \rho_a \cdot (T_{out} + T_{kelvin})$$

$$\delta\dot{Q}_{inf} = \dot{Q}_{inf,in} - \dot{Q}_{inf,out}$$

**Fenêtre = vitre de la couveuse**

$$\dot{Q}_{window} = S_{window} \cdot U_{window} \cdot (T_{in} - T_{out})$$

**Bilan sensible sur l'intérieur de la couveuse**

$$\dot{Q}_{eggs} + \dot{Q}_{fans} + \dot{Q}_{heater} - \dot{Q}_{ground,in} - \delta\dot{Q}_{inf} - \dot{Q}_{window} - \dot{Q}_{in} = dU/d\tau_{in}$$

$$\Delta U_{in} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} (dU/d\tau_{in}) d\tau$$

$$\Delta U_{in} = C_{in} \cdot (T_{in} - T_{in,0})$$

$$T_{in,0} = T_i \quad \text{Température initiale dans la pièce}$$

$$\dot{Q}_{on,off,i} = \text{Trunc} \left[ \frac{N_{res,max}}{2} \right] \quad \text{valeur initiale du chauffage = moitié de la capacité max}$$

$$\dot{Q}_{on,off} = \text{If} (\tau, \tau_1 + \Delta\tau, \dot{Q}_{on,off,i}, \dot{Q}_{on,off,i}, \text{heater}_{on,off} (T_{in,n}, \tau, \Delta\tau, N_{res,max})) \quad \text{variable de la chauffe de la couveuse = nombre de paliers activés}$$

$$\dot{Q}_{heater} = \dot{Q}_{on,off} \cdot \dot{Q}_{heater,n}$$

**Capacité de l'air intérieur + Masse interne : stockage dans l'encombrement**

$$C_{in} = C_{in,air} + C_{in,mass}$$

$$C_{in,air} = \text{volume}_{in} \cdot \rho_a \cdot cp_a \quad \text{capacité de l'air intérieur}$$

$$C_{in,mass} = m_{int} \cdot cp_{int} \quad \text{capacité lié à l'encombrement du système de retournement des oeufs}$$

$$cp_{int} = 887 \quad \text{[J/kg-K]} \quad \text{chaleur calorifique de l'alu}$$

$$m_{int} = 10 \quad \text{[kg]} \quad \text{poids du système de retournement des oeufs}$$

*Chaleur dégagée par les ventilateurs et électronique*

$$\dot{Q}_{fans} = 10 \quad \text{[W]}$$

**Simulations**

$$\text{Simu}_{type\$} = \text{'Jui}_{dim}' \quad \text{Load}_{data} = \text{toute l'année}$$

$$\tau_{h,1} = 24 \cdot 0 + 24 \cdot (31 + 28) \cdot 1 + 24 \cdot (31 + 30 + 31 + 30) \cdot 1 \quad \text{[h]} \quad \text{*0 si on veut commencer début janvier}$$

*23 janvier, 13 mars, 4 juillet*

$$\tau_{h,2} = \tau_{h,1} + 24 \cdot 1 \quad \text{[h]} \quad \text{x jours de simulation}$$

$$\Delta\tau_h = 5 \cdot \frac{1}{60} \cdot 1 \quad [\text{h}] \quad \text{pas de temps} = 5 \text{ minutes}$$

$$\tau - \tau_1 = (\tau_h - \tau_{h,1}) \cdot \left| 3600 \cdot \frac{\text{s}}{\text{h}} \right|$$

$$\tau_1 = \tau_{h,1} \cdot \left| 3600 \cdot \frac{\text{s}}{\text{h}} \right|$$

$$\tau_2 = \tau_{h,2} \cdot \left| 3600 \cdot \frac{\text{s}}{\text{h}} \right|$$

$$\Delta\tau = \Delta\tau_h \cdot \left| 3600 \cdot \frac{\text{s}}{\text{h}} \right|$$

$$\tau_{\text{jour}} = \text{FLOOR} \left[ \frac{\tau_h}{24} \right]$$

$$\tau_{\text{jour,incub}} = \text{IF} (\tau, \tau_1 + \Delta\tau, 0, 0, \text{INTEGRALVALUE} (\tau - \Delta\tau, \tau_{\text{jour}})) \\ - \text{INTEGRALVALUE} (\Delta\tau, \tau_{\text{jour}})$$

### Humidité relative

#### humidité extérieure

$$w_{\text{air,ex}} = \omega (\text{AIRH}_2\text{O}, T = T_{\text{out}}, R = \text{RH}_{\text{out}}, P = P_a)$$

$$w_{\text{air,ex,g}} = w_{\text{air,ex}} \cdot 1000$$

#### eau venant des poussins

$$m_{\text{water,egg}} = \frac{0.0004}{24 \cdot 3600} \cdot n_{\text{eggs}} \quad \text{kg/s} = 0.4 \text{ g/oeuf/jour}$$

#### eau extraite par le silica gel

$$n_{\text{sachets}} = 15 \quad \text{varie en fonction des simulations}$$

$$m_{\text{eau,silica,gel}} = n_{\text{sachets}} \cdot \frac{2}{12 \cdot 3600} \quad \text{x sachets qui absorbent 2g en 12h * 3600 s/h --> Et on les change tous les 1-2 jours}$$

$$f_{\text{gel}} = \text{Round} (\text{Interpolate1} (\text{Simu}_{\text{type\$}}, 'T', 'f_{\text{gel}}', 'T' = \tau_h)) \quad \text{bis} \quad f_{\text{gel}} = \text{changement tous les jours}, f_{\text{gel,bis}} = \text{changement tout les deux jours}$$

$$\text{silica}_{\text{on,off}} = 1 \quad \text{utilisation de silica gel ou non}$$

#### bilan de masse d'eau interne

$$v_a = v (\text{AIRH}_2\text{O}, T = T_{\text{out}}, w = w_{\text{air,ex}}, P = P_a) \quad \text{volume massique de l'air extérieur}$$

$$m_{\text{water,egg}} + (w_{\text{air,ex}} - w_{\text{air,in}}) \cdot \frac{\dot{V}_{\text{in}}}{V_a} - m_{\text{eau,silica,gel}} \cdot f_{\text{gel}} \cdot \text{silica}_{\text{on,off}} = \text{dm}_{\text{eau/dtau,in}} \quad \text{kg d'eau/s}$$

$$\Delta m_{\text{eau,in}} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} (\text{dm}_{\text{eau/dtau,in}}) d\tau$$

$$\Delta m_{\text{eau,in}} = m_{\text{air,in}} \cdot (w_{\text{air,in}} - w_{\text{air,in,0}})$$

$$w_{air,in,0} = \omega \left( AIRH_2O, T = T_{in}, R = RH_i, P = P_a \right)$$

$$RH_i = 0.45 \quad \textit{humidité relative initiale}$$

$$m_{air,in} = \text{volume}_{in} \cdot \rho_a$$

$$m_{eau,in} = w_{air,in} \cdot m_{air,in}$$

*humidité intérieure*

$$RH_{in} = \mathbf{RH} \left( AIRH_2O, T = T_{in}, w = w_{air,in}, P = P_a \right)$$

$$RH_{in,\%} = RH_{in} \cdot 100$$

*Valeurs moyennes d'humidité*

$$RH_{in,mean} = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_2} (RH_{in}) d\tau}{\tau_2 - \tau_1}$$

$$RH_{out,mean} = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_2} (RH_{out}) d\tau}{\tau_2 - \tau_1}$$

$$w_{air,ex,mean} = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_2} (w_{air,ex,g}) d\tau}{\tau_2 - \tau_1}$$

## Résultats

*eau retirée*

$$m_{eau,out} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} (m_{eau,silica,gel} \cdot f_{gel}) d\tau$$

*données de chauffage*

$$\dot{Q}_{heating,kWh} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} (\dot{Q}_{heater}) d\tau \cdot \left| 2.77778 \times 10^{-7} \cdot \frac{kWh}{J} \right|$$

$$\dot{Q}_{heating,W,mean} = \left[ \frac{\dot{Q}_{heating,kWh}}{\tau_{h,2} - \tau_{h,1}} \right] \cdot \left| 1000 \cdot \frac{W}{kW} \right| \quad \textit{énergie totale / nb d'heures ! kWh/h = kW moyen}$$

$$\tau_{utilisation,chauffage} = \dot{Q}_{heating,kWh} \cdot \left[ \frac{\left| 1000 \cdot \frac{Wh}{kWh} \right|}{N_{res,max} \cdot \dot{Q}_{heater,n}} \right] \quad \textit{h/h}$$

$$\dot{Q}_{in,kWh} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} (\dot{Q}_{in}) d\tau \cdot \left| 2.77778 \times 10^{-7} \cdot \frac{kWh}{J} \right|$$

$$\dot{Q}_{in,W,mean} = \left[ \frac{\dot{Q}_{in,kWh}}{\tau_{h,2} - \tau_{h,1}} \right] \cdot \left| 1000 \cdot \frac{W}{kW} \right|$$

$$\dot{Q}_{\text{ground,in,kWh}} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} (\dot{Q}_{\text{ground,in}}) d\tau \cdot \left| 2.77778 \times 10^{-7} \cdot \frac{\text{kWh}}{\text{J}} \right|$$

$$\dot{Q}_{\text{ground,in,W,mean}} = \left[ \frac{\dot{Q}_{\text{ground,in,kWh}}}{\tau_{h,2} - \tau_{h,1}} \right] \cdot \left| 1000 \cdot \frac{\text{W}}{\text{kW}} \right|$$

$$\dot{Q}_{\text{inf,kWh}} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} (\delta \dot{Q}_{\text{inf}}) d\tau \cdot \left| 2.77778 \times 10^{-7} \cdot \frac{\text{kWh}}{\text{J}} \right|$$

$$\dot{Q}_{\text{inf,W,mean}} = \left[ \frac{\dot{Q}_{\text{inf,kWh}}}{\tau_{h,2} - \tau_{h,1}} \right] \cdot \left| 1000 \cdot \frac{\text{W}}{\text{kW}} \right|$$

*températures moyennes*

$$T_{\text{in,mean}} = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_2} (T_{\text{in}}) d\tau}{\tau_2 - \tau_1}$$

$$T_{\text{out,mean}} = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_2} (T_{\text{out}}) d\tau}{\tau_2 - \tau_1}$$

*écart de température - pour apprécier la qualité d'une simulation : surchauffe? Sous-refroidissements?*

$$T_{\text{up},7} = \text{If} (\tau, \tau_1 + \Delta\tau, 0, 0, t_{\text{max},7} (T_{\text{in},n}, \tau, \Delta\tau))$$

$$T_{\text{down},7} = \text{If} (\tau, \tau_1 + \Delta\tau, 0, 0, t_{\text{min},7} (T_{\text{in},n}, \tau, \Delta\tau))$$

$$T_{\text{up,max}} = \text{If} (\tau, \tau_1 + \Delta\tau, 0, 0, t_{\text{warning},39,4} (T_{\text{in},n}, \tau, \Delta\tau))$$

$$T_{\text{down,max}} = \text{If} (\tau, \tau_1 + \Delta\tau, 0, 0, t_{\text{warning},35,6} (T_{\text{in},n}, \tau, \Delta\tau))$$

$$T_{\text{up,death}} = \text{If} (\tau, \tau_1 + \Delta\tau, 0, 0, t_{\text{u,death}} (T_{\text{in},n}, \tau, \Delta\tau))$$

$$T_{\text{down,death}} = \text{If} (\tau, \tau_1 + \Delta\tau, 0, 0, t_{\text{d,death}} (T_{\text{in},n}, \tau, \Delta\tau))$$

$$T_{\text{up,warning}} = \text{If} (\tau, \tau_1 + \Delta\tau, 0, 0, t_{\text{u,warning}} (T_{\text{in},n}, \tau, \Delta\tau))$$

$$T_{\text{down,warning}} = \text{If} (\tau, \tau_1 + \Delta\tau, 0, 0, t_{\text{d,warning}} (T_{\text{in},n}, \tau, \Delta\tau))$$

$$T_{\text{up>alert} = \text{If} (\tau, \tau_1 + \Delta\tau, 0, 0, t_{\text{u>alert} (T_{\text{in},n}, \tau, \Delta\tau)) \text{ } 0 \text{ ou } 1$$

$$T_{\text{down>alert} = \text{If} (\tau, \tau_1 + \Delta\tau, 0, 0, t_{\text{d>alert} (T_{\text{in},n}, \tau, \Delta\tau))$$