



**Analyse des données hygrométriques - conservation  
d'oignons au Burkina Faso**

**Rapport d'instrumentation**

**Par**

**Thomas CAZOR, Promotion 2017 – 4<sup>e</sup> année, EPF, France**

[thomas.cazor@gmail.com](mailto:thomas.cazor@gmail.com)

**Félix-Antoine Langlois, 57<sup>e</sup> Promotion, GCIUS-édition 2013, Université de Sherbrooke**

[langlois.felix.antoine@gmail.com](mailto:langlois.felix.antoine@gmail.com)

**Alexandre R. Cabral, Professeur titulaire, Dép. génie civil, Université de Sherbrooke**

[alexandre.cabral@usherbrooke.ca](mailto:alexandre.cabral@usherbrooke.ca)

**Décembre 2015**

PRELIMINAIRE

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un stage de recherche au sein du Groupe de Collaboration internationale en ingénierie de l'Université de Sherbrooke (GCIUS), sous la supervision du professeur Alexandre Cabral, du laboratoire de géotechnique et géo-environnement de la Faculté de génie, Université de Sherbrooke, Québec, Canada. Le stage s'est déroulé entre les mois d'août et décembre 2015. Félix-Antoine Langlois, qui a participé à l'étude lors de son stage au sein du GCIUS a participé dans la supervision du stagiaire.

Le GCIUS est un organisme à but non lucratif, reconnu œuvre de bienfaisance. Son exécutif et conseil d'administration sont composés des membres du GCIUS étant des étudiants en troisième année de la Faculté de génie de l'Université de Sherbrooke. Le groupe bénéficie d'un conseil d'orientation formé de professeurs, de professionnels de l'industrie privée, d'anciens coopérants et de membres du GCIUS. La principale mission du GCIUS est de réaliser des projets d'ingénierie durable dans des pays en voie de développement et d'optimiser l'impact positif de ces projets sur le niveau de vie des communautés.

## **REMERCIEMENTS**

Le projet de recherche sur les données hygrométriques des bâtiments de conservation d'oignons au Burkina Faso, a été rendu possible grâce au temps et à l'expertise des membres suivants :

L'Université de Sherbrooke, en particulier la Faculté de génie.

Les partenaires du GCIUS, en particulier la compagnie  
DECAGON DEVICES.

Site internet: <http://www.decagon.com>



Les différents donateurs à l'édition du GCIUS 2013 ([www.gcius.ca](http://www.gcius.ca)).

Bruno Jarno, de la société TONO CONSEILS et ancien collaborateur de l'Association de la voûte nubienne (<http://www.tonoconseils.com>).

Sommaire

R E M E R C I E M E N T S  
1

1. INTRODUCTION [1]

14

2. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

17

2.1. DESCRIPTION D'UNE VOÛTE NUBIENNE [1]  
17

2.2. L'INSTRUMENTATION [2]  
18

2.3. INSTRUMENTATION COMPARATIVE  
24

3. CRÉATION D'UNE BASE DE DONNÉES

26

3.1. LES DONNÉES  
26

3.2. DÉFINITION D'UNE ZONE DE CONSERVATION DES OIGNONS AU BURKINA FASO (ZCO) [3]  
27

3.3. DÉFINITION D'UNE ZONE DE CONFORT THERMIQUE AU BURKINA FASO (ZCT) [4]  
27

3.4. DÉFINITION DES VARIABLES  
28

4. ANALYSE ET MODÉLISATION DES DONNÉES

29

4.1. MÉTHODOLOGIE UTILISÉE  
29

4.2. PROCESSUS DE L'ANALYSE DES ÉCARTS DES DONNÉES HYGROMÉTRIQUES AVEC LES ZONES DE CONFORT THERMIQUE  
30

4.3. OUTILS STATISTIQUES UTILISÉS  
30

5. ÉTUDE DES MESURES HYGROMÉTRIQUES DES BÂTIMENTS EN

C H A R G E

---

33

5.1. ÉVALUATION DU COMPORTEMENT DES DONNÉES HYGROMÉTRIQUES  
34

5.2. ÉVALUATION DU COMPORTEMENT DES DONNÉES HYGROMÉTRIQUES VIS-À-VIS DE LA  
ZONE DE CONSERVATION DES OIGNONS.  
36

5.2.1. ÉTUDE QUALITATIVE

36

5.2.2. ÉTUDE QUANTITATIVE :

40

5.3. ANALYSE DE L'ÉTUDE STATISTIQUE DES MESURES DES BÂTIMENTS EN CHARGE POUR  
LES OIGNONS  
46

6. ÉTUDE DES MESURES DES BÂTIMENTS À VIDE

---

47

6.1. ÉVALUATION DU COMPORTEMENT DES DONNÉES HYGROMÉTRIQUES  
48

6.2. ÉVALUATION DU COMPORTEMENT DES DONNÉES HYGROMÉTRIQUES VIS-À-VIS DE LA  
ZONE DE CONSERVATION DES OIGNONS.  
49

6.2.1. ÉTUDE QUALITATIVE

49

6.2.2. ÉTUDE QUANTITATIVE :

52

6.3. ANALYSE DE LA PERFORMANCE DES BÂTIMENTS ET GROUPES DE BÂTIMENTS À VIDE  
POUR LES OIGNONS VIS-À-VIS DE LA ZONE DE CONSERVATION DES OIGNONS.  
67

6.4. ÉVALUATION DU COMPORTEMENT DES DONNÉES HYGROMÉTRIQUES VIS-À-VIS DE LA  
ZONE DE CONFORT THERMIQUE POUR LES HUMAINS.  
68

6.4.1. ÉTUDE QUALITATIVE

68

6.4.2. ÉTUDE QUANTITATIVE

71

6.5. ANALYSE DE LA PERFORMANCE DES BÂTIMENTS ET GROUPES DE BÂTIMENTS À VIDE  
VIS-À-VIS DE LA ZONE DE CONFORT THERMIQUE POUR LES HUMAINS.  
86

7. ÉVALUATION DE L'INFLUENCE DE LA VENTILATION PASSIVE ET

**ACTIVE SUR LES CONDITIONS INTÉRIEURES.**

**86**

**7.1. ÉVALUATION DU COMPORTEMENT DES DONNÉES HYGROMÉTRIQUES**  
**88**

**7.2. ÉVALUATION DU COMPORTEMENT DES DONNÉES HYGROMÉTRIQUES VIS-À-VIS DE LA**  
**ZONE DE CONSERVATION DES OIGNONS.**  
**89**

**8. COMPARAISON DES MESURES DES BÂTIMENTS À VIDE ET EN CHARGE**

**94**

**9. CONSERVATION DES OIGNONS**

**96**

**9.1. ÉVALUATION DU TAUX DE PERTES D'OIGNONS**  
**96**

**9.2. ÉVALUATION DU TAUX DE DÉSHYDRATATION DES OIGNONS**  
**96**

**10. ANALYSE ÉCONOMIQUE PAR BÂTIMENT**

**97**

**10.1. CHIFFRAGE DES COÛTS DANS CHAQUE VOÛTE NUBIENNE**  
**97**

**10.2. RÉPARTITION DES COÛTS DANS CHAQUE VOÛTE NUBIENNE**  
**99**

**10.3. COMPARAISON DES COÛTS DANS CHAQUE BÂTIMENT DE CONSERVATION DE**  
**L O I G N O N**  
**99**

**11. QUESTIONS DE RECHERCHE ET SOMMAIRE DES RÉPONSES.....**  
**101**

**12. LIMITATIONS DE L'ÉTUDE.....**  
**103**

**13. RECOMMANDATIONS.....**  
**105**

**14. CONCLUSION.....**  
**105**

**15. BIBLIOGRAPHIE.....**  
**106**

**ANNEXE A : PLAN VOÛTE NUBIENNE 1.....**  
**107**

**ANNEXE B : PLAN VOÛTE NUBIENNE 2.....**  
**108**

**ANNEXE C : PLAN VOÛTE NUBIENNE 3.....**  
**109**

**ANNEXE D : RÉSULTATS BRUTES DES TESTS DES MESURES DES**  
**BÂTIMENTS EN CHARGE AU NIVEAU DES CONDITIONS DE CONSERVATION**  
**HYGROMÉTRIQUE POUR LES OIGNONS**  
**110**

**ANNEXE E : RÉSULTATS BRUTES DES TESTS DES MESURES DES**  
**BÂTIMENTS À VIDE AU NIVEAU DES CONDITIONS DE CONSERVATION**  
**HYGROMÉTRIQUE POUR LES OIGNONS**  
**114**

**ANNEXE F : RÉSULTATS BRUTES DES TESTS DES MESURES DES**  
**BÂTIMENTS À VIDE AU NIVEAU DES CONDITIONS DE CONFORT**  
**THERMIQUE POUR LES HUMAINS**  
**118**

**Liste des figures**

**FIGURE 1 : SITUATION GÉOGRAPHIQUE DU VILLAGE DE YAKO**  
.....  
10

**FIGURE 2 : SCHÉMA D'UNE VOÛTE NUBIENNE**  
.....  
12

**FIGURE 3 : BÂTIMENT TRADITIONNEL**  
.....  
13

**FIGURE 4 : BÂTIMENT MODERNE**  
.....  
13

**FIGURE 5 : BÂTIMENT DE CONSERVATION EN VOÛTES NUBIENNES – MODÈLE #1**  
.....  
14

**FIGURE 6 : BÂTIMENT DE CONSERVATION EN VOÛTES NUBIENNES – MODÈLE #2**  
.....  
14

**FIGURE 7 : BÂTIMENT DE CONSERVATION EN VOÛTES NUBIENNES – MODÈLE #3**  
.....  
14

FIGURE 8 : ACQUISITEUR DE DONNÉES ET SONDE THERMIQUE EXTÉRIEURE DE DECAGON DEVICES	
16	
FIGURE 9 : TRAITEMENT DES DONNÉES HYGROMÉTRIQUE PAR LE LOGICIEL ECH2O UTILITY	
16	
FIGURE 10 : PLAN D'INSTRUMENTATION À VIDE PENDANT LES SAISONS FROIDE ET CHAUDE	
17	
FIGURE	1 1
24	
FIGURE	1 2
24	
FIGURE	1 3
25	
FIGURE 14 : PORTRAIT DU CYCLE (TEMPÉRATURE/HUMIDITÉ RELATIVE) PAR RAPPORT À LA ZONE DE CONFORT DES OIGNONS PENDANT UNE JOURNÉE TYPIQUE DE 24 HEURES DU MOIS DE MAI (CAMPAGNE EN CHARGE, SAISON HUMIDE CHAUDE)	
28	
FIGURE 15 : PORTRAIT DE L'ÉCART DU CYCLE (TEMPÉRATURE/HUMIDITÉ RELATIVE) AVEC LA ZONE DE CONFORT DES OIGNONS PENDANT UNE JOURNÉE TYPIQUE DE 24 HEURES DU MOIS DE MAI (CAMPAGNE EN CHARGE, SAISON HUMIDE CHAUDE)	
29	
FIGURE 16 : BOX PLOT TEMPÉRATURES – 1ÈRE SEMAINE CAMPAGNE EN CHARGE, SAISON HUMIDE	C H A U D E
33	
FIGURE 17 : BOX PLOT HUMIDITÉ RELATIVE – 1ÈRE SEMAINE CAMPAGNE EN CHARGE, SAISON HUMIDE	C H A U D E
33	
FIGURE 18 : HISTOGRAMME TEMPÉRATURES – 1ÈRE SEMAINE CAMPAGNE EN CHARGE, SAISON HUMIDE	C H A U D E
33	
FIGURE 19 : HISTOGRAMME POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉ RELATIVE DE LA PREMIÈRE SEMAINE DU MOIS DE MAI	D E M A I
33	
FIGURE 20 : TEST KRUSKAL-WALLIS TEMPÉRATURES – 1ÈRE SEMAINE CAMPAGNE EN CHARGE, SAISON HUMIDE	H U M I D E C H A U D E
34	
FIGURE 21 : TEST KRUSKAL-WALLIS HUMIDITÉ RELATIVE – 1ÈRE SEMAINE CAMPAGNE EN CHARGE, SAISON HUMIDE	S A I S O N H U M I D E C H A U D E
34	
FIGURE 22 : TEST ANOVA TEMPÉRATURES – 1ÈRE SEMAINE CAMPAGNE EN CHARGE, SAISON HUMIDE	C H A U D E
34	
FIGURE 23 : TEST ANOVA HUMIDITÉ RELATIVE – 1ÈRE SEMAINE CAMPAGNE EN CHARGE, SAISON HUMIDE	H U M I D E C H A U D E

34	<a href="#">FIGURE 24: PORTRAIT DU CYCLE T-RH PENDANT UNE JOURNÉE TYPIQUE DE 24H CAMPAGNE EN CHARGE, SAISON HUMIDE CHAUDE</a>
38	<a href="#">FIGURE 25 : TEST ANOVA TEMPÉRATURES – 1ÈRE SEMAINE CAMPAGNE EN CHARGE, SAISON HUMIDE C H A U D E</a>
38	<a href="#">FIGURE 26 : TEST ANOVA HUMIDITÉ RELATIVE – 1ÈRE SEMAINE CAMPAGNE EN CHARGE, SAISON HUMIDE CHAUDE</a>
38	<a href="#">FIGURE 27 : PORTRAIT DU CYCLE (TEMPÉRATURE/HUMIDITÉ RELATIVE) PAR RAPPORT À LA ZONE DE CONFORT DES OIGNONS PENDANT UNE JOURNÉE TYPIQUE DE 24 HEURES DE LA SEMAINE C2S1</a>
41	<a href="#">FIGURE 28 : PORTRAIT DE L'ÉCART DU CYCLE (TEMPÉRATURE/HUMIDITÉ RELATIVE) AVEC LA ZONE DE CONFORT DES OIGNONS PENDANT UNE JOURNÉE TYPIQUE DE 24 HEURES DE LA SEMAINE C2S1</a>
42	<a href="#">FIGURE 29 : BOX PLOT POUR LES VALEURS DE TEMPÉRATURES DE LA SEMAINE C2S1</a>
46	<a href="#">FIGURE 30 : BOX PLOT POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉ RELATIVE DE LA SEMAINE C2S1</a>
46	<a href="#">FIGURE 31 : HISTOGRAMME POUR LES VALEURS DE TEMPÉRATURES DE LA SEMAINE C2S1</a>
46	<a href="#">FIGURE 32 : HISTOGRAMME POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉ RELATIVE DE LA SEMAINE C2S1</a>
46	<a href="#">FIGURE 33 : TEST KRUSKAL-WALLIS POUR LES VALEURS DE TEMPÉRATURES DE LA SEMAINE C2S1</a>
47	<a href="#">FIGURE 34 : TEST KRUSKAL-WALLIS POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉ RELATIVE DE LA SEMAINE C2S1</a>
47	<a href="#">FIGURE 35 : TEST ANOVA POUR LES VALEURS DE TEMPÉRATURES DE LA SEMAINE C2S1</a>
47	<a href="#">FIGURE 36 : TEST ANOVA POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉ RELATIVE DE LA SEMAINE C2S1</a>
47	<a href="#">FIGURE 37 : BOX PLOT POUR LES VALEURS DE TEMPÉRATURES DE LA SEMAINE C2S1 SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT DE TEMPÉRATURE</a>
50	<a href="#">FIGURE 38 : BOX PLOT POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉ RELATIVE DE LA SEMAINE C2S1 SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT D'HUMIDITÉ RELATIVE</a>
50	<a href="#">FIGURE 39 : TEST KRUSKAL-WALLIS POUR LES VALEURS DE TEMPÉRATURES DE LA SEMAINE C2S1 SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT DE TEMPÉRATURE</a>
50	

FIGURE 40 : TEST KRUSKAL-WALLIS POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉ RELATIVE DE LA SEMAINE C2S1  
SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT D'HUMIDITÉ RELATIVE

50

FIGURE 41 : TEST KRUSTAL-WALLIS POUR LES VALEURS DE TEMPÉRATURES DE LA SEMAINE C2S1  
SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT DE TEMPÉRATURE

51

FIGURE 42: TEST KRUSTAL-WALLIS POUR LES VALEURS DE TEMPÉRATURE DE LA SEMAINE C2S1 SANS  
PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT DE TEMPÉRATURE

51

FIGURE 43 : TEST ANOVA POUR LES VALEURS DE TEMPÉRATURES DE LA SEMAINE C2S1 SANS  
PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT DE TEMPÉRATURE

51

FIGURE 44 : TEST ANOVA POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉ RELATIVE DE LA SEMAINE C2S1 SANS  
PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT D'HUMIDITÉ RELATIVE

51

FIGURE 45: PORTRAIT DU CYCLE (TEMPÉRATURE/HUMIDITÉ RELATIVE) PAR RAPPORT À LA ZONE DE  
CONFORT DES OIGNONS PENDANT UNE JOURNÉE TYPIQUE DE 24 HEURES DE LA SEMAINE C2S1

57

FIGURE 46 : TEST ANOVA POUR LES VALEURS DE TEMPÉRATURES DE LA SEMAINE C2S1 SANS  
PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT DE TEMPÉRATURES

57

FIGURE 47 : TEST ANOVA POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉ RELATIVE DE LA SEMAINE C2S1 SANS  
PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT D'HUMIDITÉ RELATIVE

57

FIGURE 48: PORTRAIT DU CYCLE (TEMPÉRATURE/HUMIDITÉ RELATIVE) PAR RAPPORT À LA ZONE DE  
CONFORT THERMIQUE PENDANT UNE JOURNÉE TYPIQUE DE 24 HEURES DE LA SEMAINE C2S1

58

FIGURE 49 : PORTRAIT DE L'ÉCART DU CYCLE (TEMPÉRATURE/HUMIDITÉ RELATIVE) AVEC LA ZONE DE  
CONFORT THERMIQUE PENDANT UNE JOURNÉE TYPIQUE DE 24 HEURES DE LA SEMAINE C2S1

59

FIGURE 50 : BOX PLOT POUR LES VALEURS DE TEMPÉRATURES DE LA SEMAINE C2S1

63

FIGURE 51 : BOX PLOT POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉ RELATIVE DE LA SEMAINE C2S1

63

FIGURE 52 : HISTOGRAMME POUR LES VALEURS DE TEMPÉRATURES DE LA SEMAINE C2S1

63

FIGURE 53 : HISTOGRAMME POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉ RELATIVE DE LA SEMAINE C2S1

63

FIGURE 54: TEST KRUSKAL-WALLIS POUR LES VALEURS DE TEMPÉRATURES DE LA SEMAINE C2S1

64

FIGURE 55 : TEST KRUSKAL-WALLIS POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉ RELATIVE DE LA SEMAINE C2S1

64

FIGURE 56 : TEST ANOVA POUR LES VALEURS DE TEMPÉRATURES DE LA SEMAINE C2S1

64

FIGURE 57 : TEST ANOVA POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉ RELATIVE DE LA SEMAINE C2S1

64

FIGURE 58: BOX PLOT POUR LES VALEURS DE TEMPÉRATURES DE LA SEMAINE C2S1 SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT DE TEMPÉRATURE

67

FIGURE 59 : BOX PLOT POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉ RELATIVE DE LA SEMAINE C2S1 SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT D'HUMIDITÉ RELATIVE

67

FIGURE 60 : TEST KRUSKAL-WALLIS POUR LES VALEURS DE TEMPÉRATURES DE LA SEMAINE C2S1 SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT DE TEMPÉRATURE

67

FIGURE 61 : TEST KRUSKAL-WALLIS POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉ RELATIVE DE LA SEMAINE C2S1 SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT D'HUMIDITÉ RELATIVE

67

FIGURE 62 : TEST KRUSKAL-WALLIS POUR LES VALEURS DE TEMPÉRATURES DE LA SEMAINE C2S1 SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT DE TEMPÉRATURE

68

FIGURE 63 : TEST KRUSKAL-WALLIS POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉ RELATIVE DE LA SEMAINE C2S1 SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT D'HUMIDITÉ RELATIVE

68

FIGURE 64 : TEST ANOVA POUR LES VALEURS DE TEMPÉRATURES DE LA SEMAINE C2S1 SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT DE TEMPÉRATURE

68

FIGURE 65 : TEST ANOVA POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉ RELATIVE DE LA SEMAINE C2S1 SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT D'HUMIDITÉ RELATIVE

68

FIGURE 66 : PORTRAIT DU CYCLE (TEMPÉRATURE/HUMIDITÉ RELATIVE) PAR RAPPORT À LA ZONE DE CONFORT DES OIGNONS PENDANT UNE JOURNÉE TYPIQUE DE 24 HEURES DE LA SEMAINE C2S1

73

FIGURE 67 : TEST ANOVA POUR LES VALEURS DE TEMPÉRATURES DE LA SEMAINE C2S1 SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT DE TEMPÉRATURES

73

FIGURE 68 : TEST ANOVA POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉ RELATIVE DE LA SEMAINE C2S1 SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT D'HUMIDITÉ RELATIVE

73

FIGURE 69 : TEST KRUSKAL-WALLIS POUR LES VALEURS DES TEMPÉRATURES DE LA VOÛTE NUBIENNE TRIPLE ÉPAISSE (CAMPAGNE À VIDE, SAISON SÈCHE CHAUDE)

76

FIGURE 70 : TEST KRUSTAL-WALLIS POUR LES VALEURS DES TEMPÉRATURES EXTÉRIEURES  
(CAMPAGNE À VIDE, SAISON SÈCHE CHAUDE)

76

FIGURE 71 : TEST KRUSTAL-WALLIS POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉS RELATIVES DE LA VOÛTE  
NUBIENNE TRIPLE ÉPAISSE (CAMPAGNE À VIDE, SAISON SÈCHE CHAUDE)

76

FIGURE 72 : TEST KRUSTAL-WALLIS POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉS RELATIVES EXTÉRIEURES  
(CAMPAGNE À VIDE, SAISON SÈCHE CHAUDE)

76

FIGURE 73 : TEST ANOVA POUR LES VALEURS DES TEMPÉRATURES DE LA VOÛTE NUBIENNE TRIPLE  
ÉPAISSE (CAMPAGNE À VIDE, SAISON SÈCHE CHAUDE)

78

FIGURE 74 : TEST ANOVA POUR LES VALEURS DES TEMPÉRATURES EXTÉRIEURES (CAMPAGNE À VIDE,  
SAISON SÈCHE CHAUDE)

78

FIGURE 75 : TEST ANOVA POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉS RELATIVES DE LA VOÛTE NUBIENNE  
TRIPLE ÉPAISSE (CAMPAGNE À VIDE, SAISON SÈCHE CHAUDE)

78

FIGURE 76 : TEST ANOVA POUR LES VALEURS D'HUMIDITÉS RELATIVES EXTÉRIEURES (CAMPAGNE À  
VIDE, SAISON SÈCHE CHAUDE)

78

FIGURE 77 : TEST ANOVA POUR LES VALEURS DES TEMPÉRATURES DE LA VOÛTE NUBIENNE TRIPLE  
ÉPAISSE (CAMPAGNE À VIDE, SAISON SÈCHE CHAUDE)

80

FIGURE 78 : NOMBRE D'OIGNON POURRI DANS UN FILET DE 8 OIGNONS APRÈS UNE CONSERVATION DE 3  
MOIS DANS LES DIFFÉRENTS BÂTIMENTS INSTRUMENTÉS

82

FIGURE 79 : TAUX DE PERTE DE POIDS DES OIGNONS DANS UN FILET DE 8 OIGNONS APRÈS UNE  
CONSERVATION DE 3 MOIS DANS LES DIFFÉRENTS BÂTIMENTS INSTRUMENTÉS

82

FIGURE 80 : RÉPARTITION DES COÛTS POUR LA VN DOUBLE

84

FIGURE 81: RÉPARTITION DES COÛTS POUR LA VN TRIPLE

84

FIGURE 82 : RÉPARTITION DES COÛTS POUR LA VN TRIPLE ÉPAISSE

84

FIGURE 83: COMPARAISON DES COÛTS DANS CHAQUE BÂTIMENT DE CONSERVATION DE L'OIGNON

85

FIGURE 2 TEST ANOVA SUR LES ÉCARTS DE TEMPÉRATURE ET D'HUMIDITÉ ENTRE LES VALEURS  
OBTENUES À L'INTÉRIEUR DES BÂTIMENTS ET LES CELLES QUI DÉFINISSENT LES ZONES DE  
CONFORT THERMIQUE POUR LA CONSERVATION DES OIGNONS – CAMPAGNE EN CHARGE, SAISON  
HUMIDE CHAUDE

87

### Liste des tableaux

TABLEAU 1 : EMBLEMMENT DES MESURES NÉCESSAIRES DANS LES BÂTIMENTS TRADITIONNELS

14

TABLEAU 2 : EMBLEMMENT DES MESURES NÉCESSAIRES DANS LES BÂTIMENTS EN VOÛTES NUBIENNES

15

TABLEAU 3 : BÂTIMENTS INSTRUMENTÉS

19

TABLEAU 4 : DÉFINITION DES VARIABLES

21

TABLEAU 5 : SCÉNARIOS DE MESURES POUR LES BÂTIMENTS EN CHARGES

26

TABLEAU 6: TABLEAU RÉCAPITULATIF DES MESURES DU MOIS DE MAI - CAMPAGNE EN CHARGE, SAISON HUMIDE CHAUDE

30

TABLEAU 7 : PVALUE AVEC LE WILCOXON RANK SUM TEST TEMPÉRATURES – 1ÈRE SEMAINE CAMPAGNE EN CHARGE, SAISON HUMIDE CHAUDE

35

TABLEAU 8 : PVALUE AVEC LE WILCOXON RANK SUM TEST HUMIDITÉ RELATIVE – 1ÈRE SEMAINE CAMPAGNE EN CHARGE, SAISON HUMIDE CHAUDE

35

TABLEAU 9 : PVALUE AVEC TWO SAMPLE T-TEST TEMPÉRATURES – 1ÈRE SEMAINE CAMPAGNE EN CHARGE, SAISON HUMIDE CHAUDE

35

TABLEAU 10 : PVALUE AVEC TWO SAMPLE T-TEST HUMIDITÉ RELATIVE – 1ÈRE SEMAINE CAMPAGNE EN CHARGE, SAISON HUMIDE CHAUDE

36

TABLEAU 11 : SCÉNARIOS DE MESURES POUR LES BÂTIMENTS VIDES

39

TABLEAU 12: TABLEAU RÉCAPITULATIF DES MESURES DE C2S1 POUR ZCO

43

TABLEAU 13 : PVALUE AVEC LE WILCOXON RANK SUM TEST AVEC LES DONNÉES DE TEMPÉRATURES

48

TABLEAU 14 : PVALUE AVEC WILCOXON RANK SUM TEST AVEC LES DONNÉES D'HUMIDITÉ RELATIVE

48

TABLEAU 15 : PVALUE AVEC TWO SAMPLE T-TEST AVEC LES DONNÉES DE TEMPÉRATURES

48

<u>TABLEAU 16 : pVALUE AVEC TWO SAMPLE T-TEST AVEC LES DONNÉES D'HUMIDITÉ RELATIVE</u>	
.....	
48	
<u>TABLEAU 17 : pVALUE AVEC LE WILCOXON RANK SUM TEST AVEC LES DONNÉES DE TEMPÉRATURE SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT DE TEMPÉRATURES</u>	
.....	
52	
<u>TABLEAU 18 : pVALUE AVEC WILCOXON RANK SUM TEST AVEC LES DONNÉES D'HUMIDITÉ RELATIVE SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT D'HUMIDITÉ RELATIVE</u>	
.....	
52	
<u>TABLEAU 19 : pVALUE AVEC TWO SAMPLE T-TEST AVEC LES DONNÉES DE TEMPÉRATURE SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT DE TEMPÉRATURES</u>	
.....	
52	
<u>TABLEAU 20: pVALUE AVEC TWO SAMPLE T-TEST AVEC LES DONNÉES D'HUMIDITÉ RELATIVE SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT D'HUMIDITÉ RELATIVE</u>	
.....	
52	
<u>TABLEAU 21: TABLEAU RÉCAPITULATIF DES MESURES DE C2S1 POUR ZCT</u>	
.....	
60	
<u>TABLEAU 22 : pVALUE AVEC LE WILCOXON RANK SUM TEST AVEC LES DONNÉES DE TEMPÉRATURES</u>	
.....	
65	
<u>TABLEAU 23 : pVALUE AVEC WILCOXON RANK SUM TEST AVEC LES DONNÉES D'HUMIDITÉ RELATIVE</u>	
.....	
65	
<u>TABLEAU 24 : pVALUE AVEC TWO SAMPLE T-TEST AVEC LES DONNÉES DE TEMPÉRATURES</u>	
.....	
65	
<u>TABLEAU 25 : pVALUE AVEC TWO SAMPLE T-TEST AVEC LES DONNÉES D'HUMIDITÉ RELATIVE</u>	
.....	
65	
<u>TABLEAU 26 ; pVALUE AVEC LE WILCOXON RANK SUM TEST AVEC LES DONNÉES DE TEMPÉRATURES SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT DE TEMPÉRATURE</u>	
.....	
69	
<u>TABLEAU 27 : pVALUE AVEC WILCOXON RANK SUM TEST AVEC LES DONNÉES D'HUMIDITÉ RELATIVE SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT D'HUMIDITÉ RELATIVE</u>	
.....	
69	
<u>TABLEAU 28 : pVALUE AVEC TWO SAMPLE T-TEST AVEC LES DONNÉES DE TEMPÉRATURES SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT DE TEMPÉRATURE</u>	
.....	
69	
<u>TABLEAU 29 : pVALUE AVEC TWO SAMPLE T-TEST AVEC LES DONNÉES D'HUMIDITÉ RELATIVE SANS PRENDRE EN COMPTE LES VALEURS DANS LA PLAGE DE CONFORT D'HUMIDITÉ RELATIVE</u>	
.....	
69	
<u>TABLEAU 30 : pVALUE AVEC LE WILCOXON RANK SUM TEST AVEC LES DONNÉES DE TEMPÉRATURES</u>	
.....	
77	
<u>TABLEAU 31 : pVALUE AVEC LE WILCOXON RANK SUM TEST AVEC LES DONNÉES DE TEMPÉRATURES</u>	
.....	
77	
<u>TABLEAU 32 : pVALUE AVEC LE WILCOXON RANK SUM TEST AVEC LES DONNÉES D'HUMIDITÉS</u>	
<u>R E L A T I V E S</u>	

77

TABLEAU 33 : PVALUE AVEC LE WILCOXON RANK SUM TEST AVEC LES DONNÉES D'HUMIDITÉS  
R E L A T I V E S

77

TABLEAU 34 : PVALUE AVEC TWO SAMPLE T-TEST AVEC LES DONNÉES DE TEMPÉRATURES

79

TABLEAU 35 : PVALUE AVEC TWO SAMPLE T-TEST AVEC LES DONNÉES DE TEMPÉRATURES

79

TABLEAU 36 : PVALUE AVEC TWO SAMPLE T-TEST AVEC LES DONNÉES D'HUMIDITÉS RELATIVES

79

TABLEAU 37 : PVALUE AVEC TWO SAMPLE T-TEST AVEC LES DONNÉES D'HUMIDITÉS RELATIVES

79

TABLEAU 38: CHIFFRAGE APPROXIMATIF POUR LA CONSTRUCTION DES BÂTIMENTS EN VOÛTES  
NUBIENNES (FRANCS CFA)

83

TABLEAU 39 : CHIFFRAGE APPROXIMATIF POUR LA CONSTRUCTION DES BÂTIMENTS EN VOÛTES  
NUBIENNES (CAD)

83

## **1. INTRODUCTION [1]**

Dans les pays d'Afrique de l'Ouest, le secteur des fruits et légumes est une source de revenus important, donc de réduction de la pauvreté. L'oignon représente une part allant jusqu'à 25 % de la consommation de légumes dans cette région. Le Burkina Faso se situe au 4e rang des pays producteurs d'oignon en Afrique de l'Ouest.

Au moment des récoltes en avril, le prix des oignons est au plus bas (10 à 20 €/sac de 120 kg). À cette période, le Burkina Faso est exportateur d'oignon. Une petite partie seulement des récoltes est stockée pour être revendue plus tard. À partir de juillet-août, les oignons burkinabés sont peu ou ne sont plus disponibles sur le marché et les oignons importés du Niger, des Pays-Bas ou de la France les remplacent sur les étals. Le prix du sac d'oignons est alors au plus haut (60 à 90 €/sac de 120 kg). Ainsi 4 à 6 mois après la récolte le prix moyen de vente devient 3 à 6 fois plus élevé.

Ce constat peut probablement être partagé pour tous les pays producteurs d'oignons de la sous-région. Le problème de stockage/conservation de l'oignon est aujourd'hui au cœur des préoccupations des agriculteurs, étant donné son impact important sur l'augmentation des revenus des producteurs d'oignon. Pourtant, le stockage d'oignon (de la majorité des aliments, à bien dire) se heurte à plusieurs problématiques auxquelles il faut pouvoir répondre, notamment :

- Des techniques de construction des silos de conservation adaptées peuvent-elles être implantées pour procurer un environnement plus propice à la conservation des bulbes sur de longues périodes ?
- A-t-on proposé aux producteurs d'oignons des bons « itinéraires » de production, de récolte et surtout de stockage ?
- L'organisation des producteurs autour d'actions collectives de stockage est-elle optimale ?

En Afrique de l'Ouest, des millions de familles n'ont plus accès à un habitat décent à cause de la disparition (déforestation/désertification) des ressources ligneuses naturelles utilisées dans les architectures traditionnelles, des réalités démographiques et économiques, et de la croissance de l'urbanisation. Malgré l'attrait culturel qu'elles peuvent présenter, les alternatives techniques « modernes » n'ont pas permis de proposer, au plus grand nombre, un habitat approprié et durable. Les techniques modernes nécessitent des matériaux tels que le ciment, l'acier, les tôles, les chevrons de bois, etc. Ce sont des ressources peu accessibles à la majorité, puisque très chers. De plus, ils ne s'inscrivent pas dans une optique de développement durable.

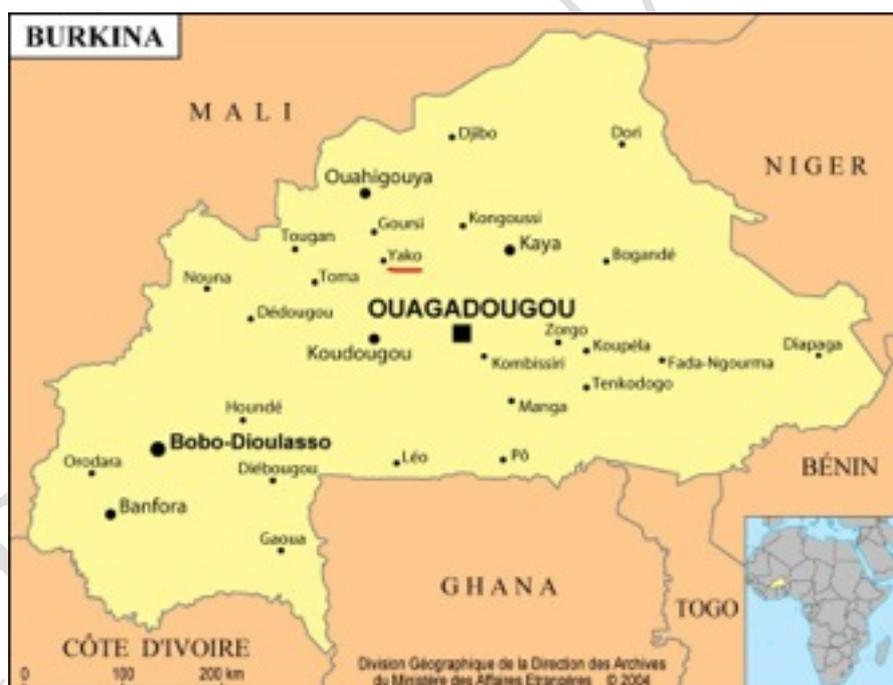
La technique des voûtes nubiennes est un procédé architectural antique, venu du Haut Nil, et assez peu connu dans les autres régions africaines. Cette technique permet de

bâtir des bâtiments aux toitures voûtées, solides, confortables et modulables. La construction peut se faire avec un outillage de base, des matériaux locaux et requiert des compétences de base. Ses spécificités consistent en l'utilisation de terre crue - matière première abondante, malaxée sous forme de mortier - et de briques séchées au soleil. On n'a pas besoin de coffrage pour le bâti de la partie voûtée, ce qui procure des économies importantes de construction.

C'est dans ce contexte que l'Association la Voûte Nubienne (<http://www.lavoutenubienne.org/>) a développé un marché de construction durable basé sur cette technique. Pourtant, la construction en voûte nubienne se heurte actuellement à plusieurs problématiques auxquelles il faut faire face, notamment :

- La technique est méconnue ; elle doit faire ses preuves vis-à-vis des producteurs.
- Il n'y a pas - ou peu - d'études prouvant ses avantages (confort, coûts, etc.) par rapport aux bâtiments actuellement utilisés pour le stockage d'oignons.

Vis-à-vis de ce constat, en 2013 le GCIUS a construit pour la coopérative maraîchère d'Ouonon trois différents silos de conservation d'oignons près de la ville de Yako, situé dans la commune de Gomponsom au Burkina Faso.



La technique de la voûte nubienne (décrite par la suite) a été choisie pour la construction des silos. Afin de tester leur performance, des capteurs de données hygrométriques (humidité relative et température) ont été installés dans les différentes voûtes nubiennes ainsi que dans trois autres installations de stockage d'oignons de la région. Depuis la fin des travaux effectués, trois campagnes de mesures ont été réalisées, soit entre février

2014 et juillet 2014. Ces campagnes ont permis d'obtenir ce qui constitue probablement la plus importante base de données hygrométriques dans des bâtiments, en Afrique de l'ouest.

L'étude des données obtenues apporte la première comparaison de trois différentes voûtes nubiennes par rapport à deux constructions traditionnelles et une moderne (voir Tableau 1). Il est important de noter que les bâtiments traditionnels étudiés ne sont pas des bâtiments rudimentaires, comme les BANCO et RUDO.

Cette étude complétée par une évaluation du confort thermique pour les humains et une courte étude économique, a pour but spécifique de comparer des bâtiments de stockage d'oignon au Burkina Faso, en répondant aux questions suivantes :

- **Est-ce que les voûtes nubiennes permettent une meilleure conservation des oignons qu'une construction conventionnelle?**
- **Est-ce qu'il y a des différences importantes entre les divers types de voûtes nubiennes?**
- **Est-ce que l'utilisation des voûtes nubiennes serait économiquement rentable?**
- **Est-ce que les oignons qui sont conservés dans une construction en voûte nubienne sont de meilleure qualité que ceux conservés dans une construction conventionnelle?**
- **La Voûte nubienne présente-t-elle un meilleur confort thermique qu'une construction conventionnelle traditionnelle, en ce qui concerne l'habitat pour les humains ?**

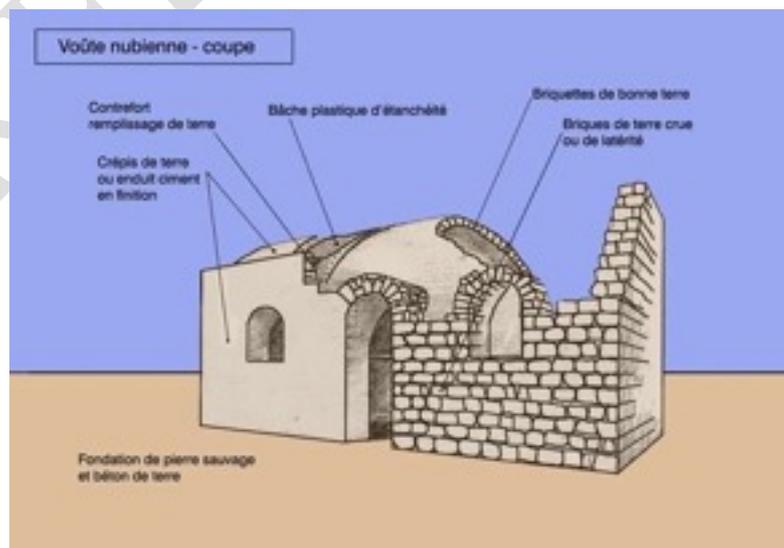
Pour répondre à ces questions, il a fallu dans un premier temps prendre en main la base de données d'instrumentation : définir une Zone de confort des Oignons, définir une Zone de confort thermique (Humain), créer une base de données EXCEL, traiter les données EXCEL.

Puis dans un second temps faire une étude statistique de la base de données d'instrumentation avec MATLAB.

## 2. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

### 2.1. Description d'une voûte nubienne [1]

- Le bâti est presque exclusivement constitué de terre crue, matière première abondante mouillée et malaxée, puis moulée sous forme de briques qui sècheront au soleil (adobes) ou utilisées directement sous forme de mortier. Seules les fondations font appel à la pierre,
- Les toitures créées sont exclusivement voûtées (pas de dôme) et permettent/favorisent l'usage du toit-terrasse par leur mise en charge,
- La construction des voûtes ne nécessite pas de coffrage ni aucune autre sorte de support,
- Les voûtes ont une portée (largeur) maximum de 3m30 et sont construites à partir de briques de dimension standard pour les murs et de briquettes pour la toiture et les voûtains,
- Un « câble-compass » est utilisé pour définir la courbe de la voûte et guider le maçon dans son travail,
- Les murs, suivant leurs différents usages, sont d'épaisseurs standardisées ainsi que les ouvertures des portes, fenêtres, et autres rangements maçonnés
- Une bâche plastique est incorporée aux mortiers de terre en finition de toiture afin d'apporter une garantie supplémentaire d'étanchéité,
- Dans le concept VN, le travail représente la quasi-totalité du coût de la construction. Ainsi, ces coûts de main-d'œuvre peuvent participer d'une économie non monétisée (auto construction, entraide, échanges) et quand il y a échange de numéraire, celui-ci est réintroduit dans les économies locales.



## **2.2. L'instrumentation [2]**

### **Principe de l'instrumentation hygrométrique**

Trois campagnes de mesures ont été réalisées entre février 2014 et juillet 2014 :

- Campagne 1 : mesure à vide sur les silos de conservation de l'oignon – saison sèche froide
- Campagne 2 : mesure à vide sur les silos de conservation de l'oignon – saison sèche chaude
- Campagne 3 : mesures en charge sur les silos de conservation de l'oignon – saison humide chaude

Deux Mesures ont été réalisées pendant les trois campagnes :

- Mesure 1 : mesure de la Température (en °C) à une fréquence de 15 minutes
- Mesure 2 : mesure de l'humidité relative (en indice) à une fréquence de 15 minutes

### **Bâtiments de conservation traditionnels**

La figure 3 représente l'un des silos de conservation traditionnelle instrumentés. Il est situé dans le village de Yako au Burkina Faso, à environ 1 kilomètre du site d'implantation des silos de conservation en voûtes nubiennes. La figure 4 illustre quant à elle un bâtiment de conservation moderne, qui emploie une technologie plus développée, habituellement employée par des associations ou des coopératives maraîchères. L'un de ces silos est situé à Gomponsom, à 6 kilomètres du site d'implantation des silos en voûtes nubiennes.



Les mesures réalisées correspondent à ceux dans le Tableau 1 :

*Tableau 1 : Emplacement des mesures nécessaires dans les bâtiments traditionnels*

Modèles	Mesures	Fréquence	Emplacement
1	Température et humidité	15 minutes	À l'intérieur, au centre bâtiment, à la mi-hauteur
			À l'extérieur, à 10 mètres du bâtiment dans une zone dégagée et bien aérée
2	Température et humidité	15 minutes	À l'intérieur, au centre bâtiment, à la mi-hauteur
			À l'extérieur, à 10 mètres du bâtiment dans une zone dégagée et bien aérée

#### **Bâtiments de conservation en Voûtes nubiennes**

Les modèles de voûtes nubiennes présentées ci-dessous sont ceux qui ont été implantés et instrumentés à Yako au Burkina Faso.

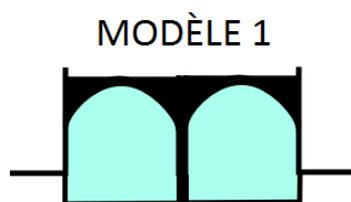


Figure 5 : Bâtiment de conservation en voûtes  
nubiennes – Modèle #1

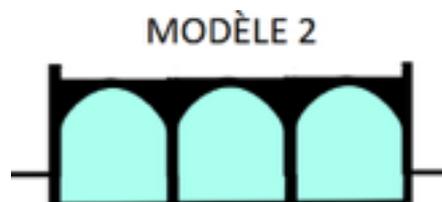


Figure 6 : Bâtiment de conservation en voûtes  
nubiennes – Modèle #2

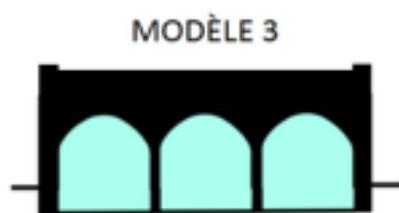


Figure 7 : Bâtiment de conservation en voûtes nubiennes – Modèle #3

PRELIMINAIRE

Les mesures réalisées pour les voûtes nubiennes correspondent à ceux du Tableau 2 :

*Tableau 2 : Emplacement des mesures nécessaires dans les bâtiments en voûtes nubiennes*

Modèles	Mesures	Fréquence	Emplacement
1	Température et humidité	15 minutes	À l'intérieur, au centre de la voûte de droite, à la mi-hauteur
			À l'intérieur, au centre de la voûte de gauche, à la mi-hauteur
			À l'extérieur, à 10 mètres du bâtiment dans une zone dégagée et bien aérée
2	Température et humidité	15 minutes	À l'intérieur, au centre de la voûte de droite, à la mi-hauteur
			À l'intérieur, au centre de la voûte du milieu, à la mi-hauteur
			À l'intérieur, au centre de la voûte de gauche, à la mi-hauteur
3	Température et humidité	15 minutes	À l'intérieur, au centre de la voûte de droite, à la mi-hauteur
			À l'intérieur, au centre de la voûte du milieu, à la mi-hauteur
			À l'intérieur, au centre de la voûte de gauche, à la mi-hauteur

Annexe A : PLAN voûte nubienne 1

Annexe B : PLAN voûte nubienne 2

Annexe C : PLAN voûte nubienne 3

PRELIMINAIRE

### Matériel utilisé

Le matériel utilisé est de type DECAGON ou équivalent. Pour chaque bâtiment dont on souhaite mesurer le comportement hygrométrique, il est composé :

- D'un ou plusieurs acquiseurs de donnée
- d'une sonde de température et d'humidité relative disposé à l'extérieur du bâtiment et destiné à mesurer les conditions extérieures.
- D'une sonde de température et d'humidité relative disposée dans l'enceinte du bâtiment et destinée à mesurer les conditions intérieures.



Figure 8 : Acquisiteur de données et sonde thermique extérieure de DECAGON DEVICES

Les sondes relèvent les valeurs des températures et d'humidité à l'endroit où est située la sonde, à intervalle régulier paramétrable, et transmettent les valeurs à l'acquisiteur de données (data logger) dont la fonction est d'archiver les données. Régulièrement, les données stockées dans l'acquisiteur de données doivent être téléchargées sur le disque dur d'un ordinateur via un logiciel spécifique conçu par le fabricant du matériel d'instrumentation. La fréquence à laquelle les données doivent être téléchargées est fonction de la fréquence d'acquisition des mesures. Plus la fréquence est grande (par exemple toutes les 15 secondes), plus les données devront être téléchargées et mémorisées souvent dans un ordinateur externe.

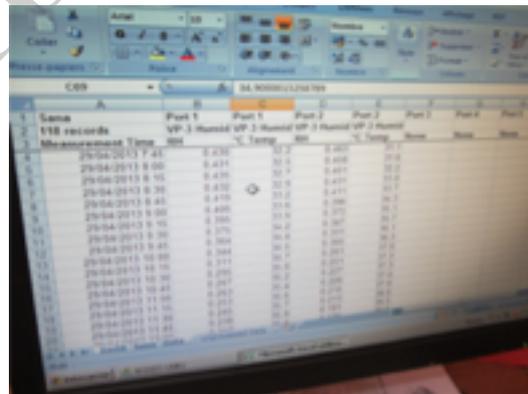
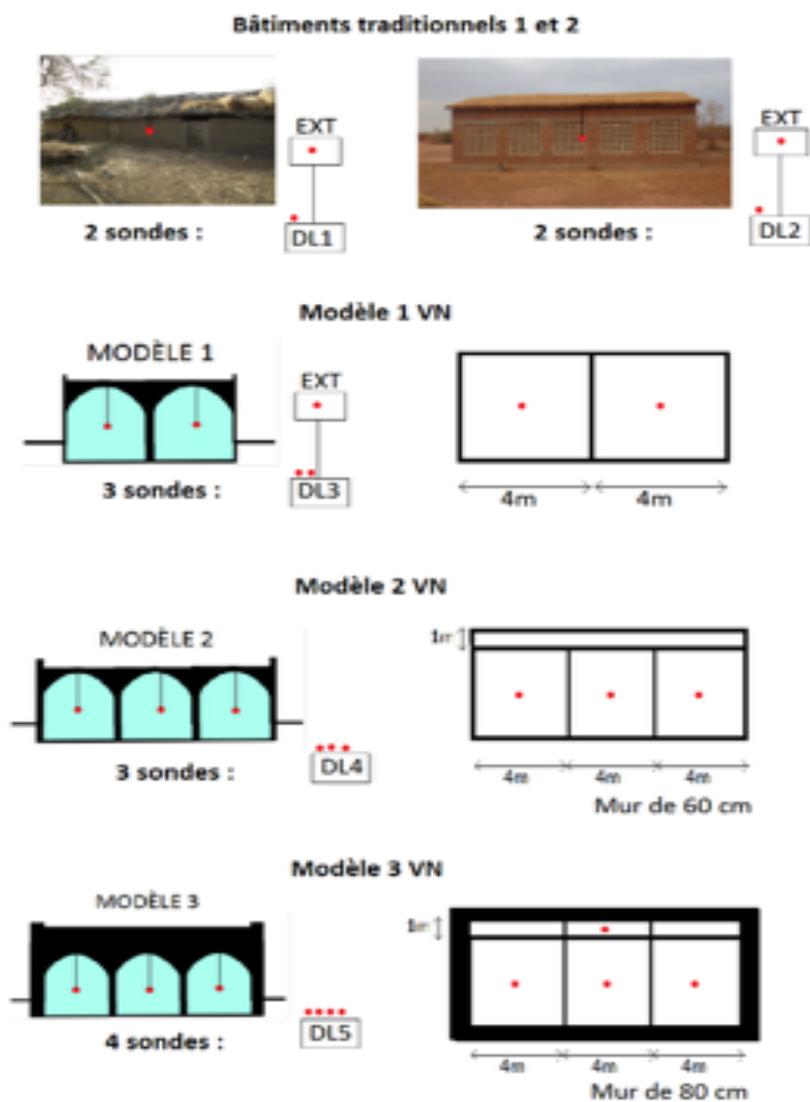


Figure 9 : Traitement des données hygrométrique par le logiciel ECH2O Utility

### Plan d'instrumentation

La Figure 10 représente le plan d'instrumentation. On y retrouve l'emplacement des sondes, ainsi que le nombre nécessaire d'instruments de mesure.

Figure 10 : Plan d'instrumentation à vide pendant les saisons froide et chaude



**Total : 5 DL et 14 sondes (dont 3 externes)**

### 2.3. Instrumentation comparative

Deux instrumentations thermiques comparatives de bâtiments Voûte Nubiennes ont été réalisées par le passé :

- « Indicateurs de confort dans la technique de la Voûte nubienne » (Urs WYSS, 2007)

Réalisée à Boromo au Burkina Faso;

Ce projet, prévu sur une année entière, est interrompu en septembre 2006 à cause d'une défaillance matérielle. Les mesures n'ont donc pas pu être réalisées sur les mois critiques de l'année, à savoir la période de fraîcheur en décembre et janvier et la saison chaude de mars à juin.

• « *Étude portant sur la technologie Voûte nubienne comme modèle de construction* » (Bruno JARNO, 2015)

Réalisée au Sénégal;

Dans cette étude il n'a pas été tenu compte ici de l'influence des paramètres « humidité relative de l'air » et « vitesse du vent. »

Ainsi notre étude apporte une comparaison de trois différentes voûtes nubienne par rapport à deux constructions traditionnelles et une moderne. Cette étude est réalisée sur une période de 152 jours de la **saison sèche froide** à la **saison humide chaude** et prend en compte les paramètres de **température** et **d'humidité relative de l'air**.

Cette étude a pour spécificité de comparer des **bâtiments de stockage de l'oignon** au Burkina Faso.

### 3. CRÉATION D'UNE BASE DE DONNÉES

#### 3.1. Les données

Les bâtiments testés incluaient toutes les voûtes prévues dans le cadre du projet du GCIUS, des bâtiments traditionnels et un bâtiment moderne. L'ensemble des bâtiments testés est présenté au tableau 3.

Tableau 3 : Bâtiments instrumentés

northNV <sub>0</sub>	<b>Voûtes Nubiennes doubles</b>
	Pour Producteur indépendant (2 VN x 4 m) Mesure prise au centre de la voûte coté nord, à la mi-hauteur
southNV <sub>0</sub>	<b>Voûtes Nubiennes doubles</b>
	Pour Producteur indépendant (2 VN x 4 m) Mesure prise au centre de la voûte coté sud, à la mi-hauteur
NV <sub>1</sub>	<b>Voûtes Nubiennes triples</b>
	Pour Coopérative de production (3 VN x 12 m + 1 zone tampon ventilée et protégée du soleil) Mesure prise au centre de la voûte du milieu, à la mi-hauteur
northNV <sub>11</sub>	<b>Voûtes Nubiennes triples épaisses</b>
	Pour Coopérative de production (3 VN x 12 m + 1 zone tampon ventilée et protégée du soleil+ murs extérieurs plus épais) Mesure prise au centre de la voûte coté nord, à la mi-hauteur
centerNV <sub>11</sub>	<b>Voûtes Nubiennes triples épaisses</b>
	Pour Coopérative de production (3 VN x 12 m + 1 zone tampon ventilée et protégée du soleil+ murs extérieurs plus épais) Mesure prise au centre de la voûte du milieu, à la mi-hauteur
southNV <sub>11</sub>	<b>Voûtes Nubiennes triples épaisses</b>
	Pour Coopérative de production (3 VN x 12 m + 1 zone tampon ventilée et protégée du soleil+ murs extérieurs plus épais) Mesure prise au centre de la voûte coté sud, à la mi-hauteur
NV out	Voûte Nubienne à l'extérieur, à 10 mètres du bâtiment dans une zone dégagée et bien aérée
TD	<b>Bâtiment traditionnel</b>
	Pour Coopérative de production (Murs en pierre de latérites, toiture en paille, claustras sur les façades longues pour l'aération) Mesure prise au centre bâtiment, à la mi-hauteur
TR <sub>0</sub>	<b>Bâtiment traditionnel B</b>
	Pour Coopérative de production (Murs en pierre de latérites, toiture en paille, claustras sur les façades longues pour l'aération) Mesure prise au centre bâtiment, à la mi-hauteur
TR out	Bâtiment traditionnel à l'extérieur, à 10 mètres du bâtiment dans une zone dégagée et bien aérée
MR	<b>Bâtiment moderne</b>
	Pour Coopérative de production (Murs en parpaing ou pierre de latérites, toiture en tôle, fenêtres d'aération, stockage souterrain) Mesure prise au centre bâtiment, à la mi-hauteur
MR out	Bâtiment moderne à l'extérieur, à 10 mètres du bâtiment dans une zone dégagée et bien aérée

### 3.2. Définition d'une zone de conservation des oignons au Burkina Faso (ZCO) [3]



Les bulbes d'oignons se détériorent rapidement à des températures qui éliminent leur dormance (5-15 °C). On peut les conserver plus longtemps à des températures proches de 0 °C, ou des 20-30 °C, mais ils doivent être convenablement séchés, à une humidité

relative optimale de 65-80 %. Les entrepôts ne nécessitent qu'une ventilation libre si les bulbes sont suspendus en bottes ou en tresses, dans des silos de conservation superposée.

ZCO	
°C Temp	RH
20	0,65
20	0,8
30	0,8
30	0,65
20	0,65

On définit une zone de conservation des oignons au Burkina Faso (ZCO).

$20\text{ °C} \leq T \leq 30\text{ °C}$  si  $65\% \leq RH \leq 80\%$

T = Température RH = Humidité relative

### 3.3. Définition d'une zone de confort thermique au Burkina Faso (ZCT) [4]

L'habitat en VN, ouvrages destinés aux populations sahéliennes, sert avant tout pendant la nuit. Généralement, la population sahélienne ne dispose que de draps légers pour se couvrir pendant la nuit, d'où la nécessité de fixer un seuil minimal plus élevé que celui généralement retenu.

Pendant la journée les activités dans ce genre de bâtiment sont essentiellement le repos et les activités sédentaires. Les tenues sont légères. Il n'y a à priori pas de ventilation installée, on peut donc négliger les extensions de la ZCT dues à la ventilation.

ZCT	
°C Temp	RH
25	0,2
30	0,2
28	0,8
25	0,8
25	0,2

On définit une zone de confort thermique au Burkina Faso (ZCT).

$25\text{ °C} \leq T \leq 30\text{ °C}$  si  $20\% \leq HR \leq 80\%$

T = Température RH = Humidité relative

### 3.4. Définition des variables

Pour simplifier l'analyse :

- on admet que les cycles extérieurs sont similaires sur les trois sites  
-> Moyenne des 3 pour un temps t
  
- on admet que les cycles Nord, Sud et Centre sont similaires dans chaque bâtiment  
-> Moyenne des 3 pour un temps t.
  
- on admet que les cycles TB et TB<sub>B</sub> sont similaires  
-> Moyenne des 2 pour un temps t

Ainsi les données brutes ont été traitées pour obtenir dans **données moyennes** définies part :

*Tableau 4 : Définition des variables*

NV	Moyenne Voûte Nubienne doubles nord et sud
NV	Voûte nubienne triple
NV	Moyenne Voûte Nubienne triples épaisse nord, sud et centre
TB	Moyenne Bâtiment traditionnel + Bâtiment traditionnel b
MB	Bâtiment moderne
T out	Moyenne extérieure Bâtiment moderne + extérieur Voûte Nubienne + extérieure Bâtiment traditionnel

4.

## 4. ANALYSE ET MODÉLISATION DES DONNÉES

### 4.1. Méthodologie utilisée

Les bâtiments testés incluaient toutes les voûtes prévues dans le cadre du projet du GCIUS 2013, deux bâtiments traditionnels et un bâtiment moderne.

L'étude pour tester la performance des voûtes s'est orientée selon deux axes qui permettent d'évaluer la performance au niveau des conditions hygrométriques dans un bâtiment:

1. Vis-à-vis de la conservation des oignons. Cette partie se subdivise en trois analyses, à savoir :
  1. Confort thermique pour les oignons
  2. L'inertie thermique
  3. Conservation des oignons (étude de l'évolution d'échantillons d'oignons placés dans les différents bâtiments)
2. Vis-à-vis du confort thermique humain.

Les données obtenues suite à l'instrumentation des bâtiments ont permis d'analyser l'évolution dans le temps des données hygrométriques afin d'évaluer le comportement des bâtiments (1.1 ci-dessus). On a analysé le portrait du cycle d'une journée représentative de 24h des données hygrométriques à l'intérieur puis à l'extérieur de chaque bâtiment. On a analysé les écarts de température et d'humidité entre les valeurs obtenues à l'intérieur des bâtiments et les celles qui définissent les zones de confort thermique pour la conservation des oignons. Ces zones sont définies à partir de données obtenues dans la littérature technique et des rapports de la *Food and Agriculture Organization* (FAO; organisme des Nations Unies). Surtout, on a vérifié, au moyen d'une étude statistique, s'il y avait des écarts significatifs entre les comportements des différents bâtiments. L'étude du confort thermique pour les oignons incluait une analyse préliminaire de l'apport de la ventilation (volets ouverts ou fermés, la journée et/ou la nuit ; et ventilation forcée).

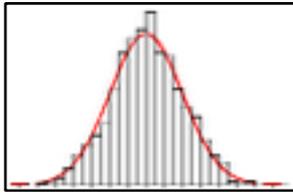
L'inertie thermique du bâtiment est reconnue comme un facteur pouvant améliorer le confort thermique pour les humains. L'inertie thermique d'un bâtiment peut simplement être définie comme sa capacité à stocker de la chaleur et à la restituer petit à petit. Cette capacité permet de limiter les effets d'une variation "rapide" de la température extérieure sur celle à l'intérieur. Plus l'inertie est grande, moins il y a des variations de température et plus grand est le confort thermique pour les humains. Il est plausible de croire que l'inertie thermique pourrait améliorer aussi la conservation des oignons. Cependant, ce projet n'a pas permis d'analyser cette hypothèse *in extenso*. Par contre, des conclusions partielles ont pu être tirées de l'étude de la conservation (et pertes) d'échantillons d'oignons placés dans les différents bâtiments analysés.

Nous avons complété l'étude par une succincte analyse économique des différentes options de stockage. Seuls les paramètres de construction des bâtiments ont été analysés.

## 4.2. Processus de l'analyse des écarts des données hygrométriques avec les zones de confort thermique



## 4.3. Outils statistiques utilisés



Avant tout pour utiliser un test statistique il est bon de savoir si la série de données (effectif > 30) est gaussienne ou non.

Lorsque la série de données donne une représentation graphique de la même forme que celle indiquée à la figure 10, les données recueillies sont qualifiées de **données gaussiennes**.

Si on calcule pour de telles données la **moyenne notée**  $m$  est l'**écart-type**  $s$ , on peut noter que environ 95 % des données se trouvent dans l'intervalle  $[m - 2s ; m + 2s]$ ; (cf. : figure 11).

Cet intervalle est appelé **plage de normalité** (pour le **niveau de confiance** 0,95).

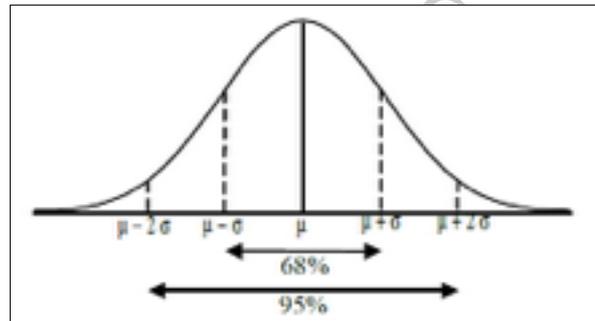


Figure 12

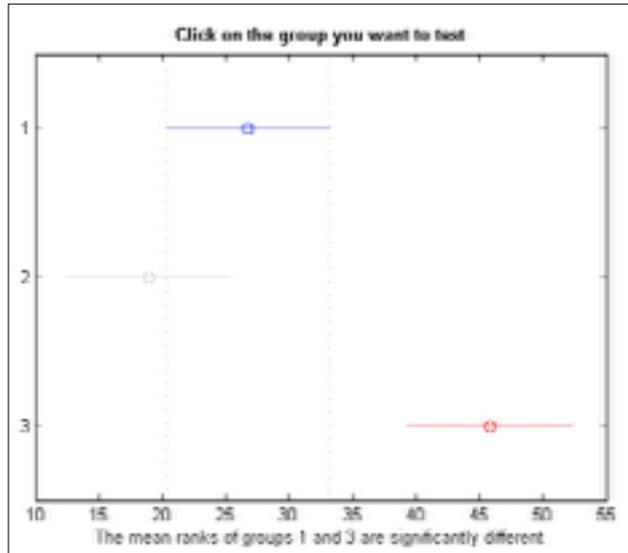
Toutes les données ne sont pas gaussiennes et ne respectent pas ces répartitions!

Lorsque l'on est en présence d'au moins trois échantillons gaussiens, on peut faire une **analyse de la variance** (en anglais ANOVA : **analysis of variance**). Il s'agit d'un test statistique permettant de déterminer si les échantillons proviennent d'une même population ayant des caractéristiques identiques ou si au moins un échantillon provient d'une population différente des autres. L'objectif d'une analyse de variance (ANOVA) est de tester la significativité des différences de moyennes en comparant les variances.

Lorsque la série de données n'est pas gaussienne, le test de **Kruskal-Wallis** est une alternative non paramétrique à l'ANOVA à utiliser lorsque l'on est en présence d'au moins trois échantillons non gaussiens. Le paramètre de position est conceptuellement proche de la médiane, mais le test de Kruskal-Wallis prend en compte plus d'informations que la position au seul sens de la médiane.

Dans le cadre de notre étude, nous effectuerons ces deux tests malgré le fait que nos données ne soient pas gaussiennes. Si les deux tests donnent des valeurs semblables, notre certitude par rapport aux résultats augmente.

Avec le logiciel Matlab, le Test **Kruskal-Wallis** donne un graphique du type (figure 12),



Les résultats indiquent sur la figure 12 qu'il existe une différence significative entre les groupes 1 et 3, donc le test rejette l'hypothèse que les données de ces deux groupes proviennent de la même distribution. Il est de même pour les groupes 2 et 3. Cependant, il n'y a pas de différence significative entre les groupes 1 et 2. Par conséquent, ces résultats suggèrent que les données dans le groupe 1 et 2 proviennent de la même répartition, et les données du groupe 3 proviennent d'une répartition différente.

*Remarque : Écriture dans Matlab*

*Pour la fonction Kruskal-Wallis : [ p ,*

*tbl, stats] = kruskalwallis (...)*

*Pour la fonction ANOVA :*

*[p, table, stats] = anova1 (...)*

Le **test t** est la méthode utilisée lorsque l'on est en présence de données gaussiennes. Ce test reporte un niveau  $p$  (p Value) représentant la probabilité d'erreur associée à l'acceptation d'une hypothèse quant à l'existence d'une différence.

Le test de **Wilcoxon** est l'alternative au test  $t$  pour des données non gaussiennes.

Dans notre étude on définit qu'il y a, un écart significatif si  $p\text{Value} > 0,05$

C'est-à-dire il y a un écart à 95 % (pour le niveau de confiance 0,95).

## 5. ÉTUDE DES MESURES HYGROMÉTRIQUES DES BÂTIMENTS EN CHARGE

Tableau 5 : Scénarios de mesures pour les bâtiments en charges

	Date	Code	Campagnes et scénarios	northNV <sub>b</sub>	southNV <sub>b</sub>	NV <sub>r</sub>	northNV <sub>rr</sub>	centerNV <sub>r</sub>	southNV <sub>rr</sub>	TB	TB <sub>#</sub>	MB	TB out	MB out	NV out	
Campagne 3	2014-05-01 AU 2014-05-07	C3S1	Mesures en charge sur les silos de conservation de l'oignon Saison humide chaude													
	2014-05-08 AU 2014-05-14	C3S2														
	2014-05-15 AU 2014-05-21	C3S3														
	2014-05-22 AU 2014-05-28	C3S4														
	2014-05-29 AU 2014-06-04	C3S5														
	2014-06-05 AU 2014-06-11	C3S6														
	2014-06-12 AU 2014-06-18	C3S7														
	2014-06-19 AU 2014-06-25	C3S8														
	2014-06-26 AU 2014-07-02	C3S9														
	2014-07-03 AU 2014-07-09	C3S10														
	2014-07-10 AU 2014-07-16	C3S11														

Les cases hachurées représentent les données que nous avons.

### 5.1. Évaluation du comportement des données hygrométriques

Ci-dessous sont représentées les températures et les humidités relatives minimales, moyennes et maximales ainsi que l'amplitude moyenne des températures et des humidités relatives sur la période d'instrumentation en charge.

		OU T	TB	MB	NVD	NVT	NVT T
Température sur la période	Maximale	43,6	40,1	37,3	40,0	39,2	39,4
	Minimale	19,8	22,3	25,0	22,7	25,4	21,8
	Moyenne	30,8	30,9	30,6	31,7	32,2	31,8
	amplitude maximale journalière (T max - T min)	19,7	14,7	8,7	13,9	10,8	12,4
	amplitude moyenne journalière (T max - T min)	11,4	8,1	4,5	6,5	5,3	5,4
Humidité relative sur la période	Maximale	0,99	0,90	0,80	0,81	0,78	0,84
	Minimale	0,15	0,18	0,28	0,23	0,20	0,19
	Moyenne	0,57	0,57	0,61	0,55	0,53	0,53
	amplitude maximale journalière (RH max - RH min)	0,63	0,50	0,31	0,43	0,37	0,43
	amplitude moyenne journalière (RH max - RH min)	0,37	0,29	0,17	0,21	0,21	0,21



Instrumentation	7829	mesures
	82	jours

Ces analyses permettent de situer l'inertie thermique des bâtiments en Voûte nubienne devant le bâtiment traditionnel et derrière le bâtiment moderne pour la période des

mesures en charge. **L'inertie thermique se caractérise par l'atténuation des variations de température à l'intérieur du bâtiment.**

PRELIMINAIRE

## 5.2. Évaluation du comportement des données hygrométriques vis-à-vis de la Zone de conservation des oignons.

### 5.2.1. Étude qualitative

Dans un premier temps les données brutes ont été traitées pour tirer le **portrait typique d'une journée de 24 heures** à l'intérieur de la campagne de mesures. Les observations porteront donc sur cette journée typique. (Moyenne de chaque ¼ d'heure à chaque même horaire t)

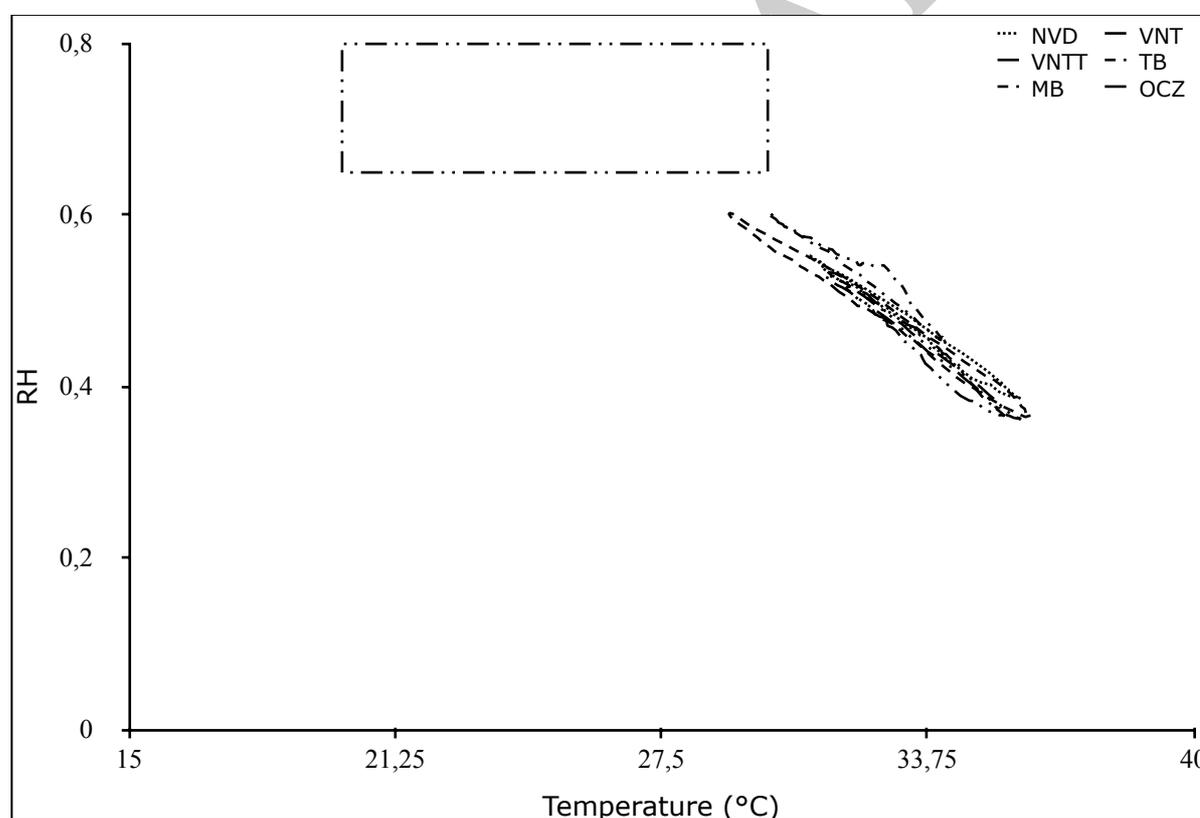


Figure 14 : Portrait du cycle (Température/Humidité relative) par rapport à la Zone de Confort des Oignons pendant une journée typique de 24 heures du mois de mai (Campagne en charge, saison humide chaude)

Quel que soit le bâtiment étudié, le cycle (Température/Humidité relative) de chaque bâtiment :

- Il n'atteint pas la Zone de conservation des oignons définie.
- Il est **fortement** influencé par le cycle (Température/Humidité relative) extérieur

Dans un second temps les données de la journée type ont été traitées pour tirer le portrait typique de l'ÉCART entre le Cycle (Température/Humidité relative) et la Zone de conservation des oignons.

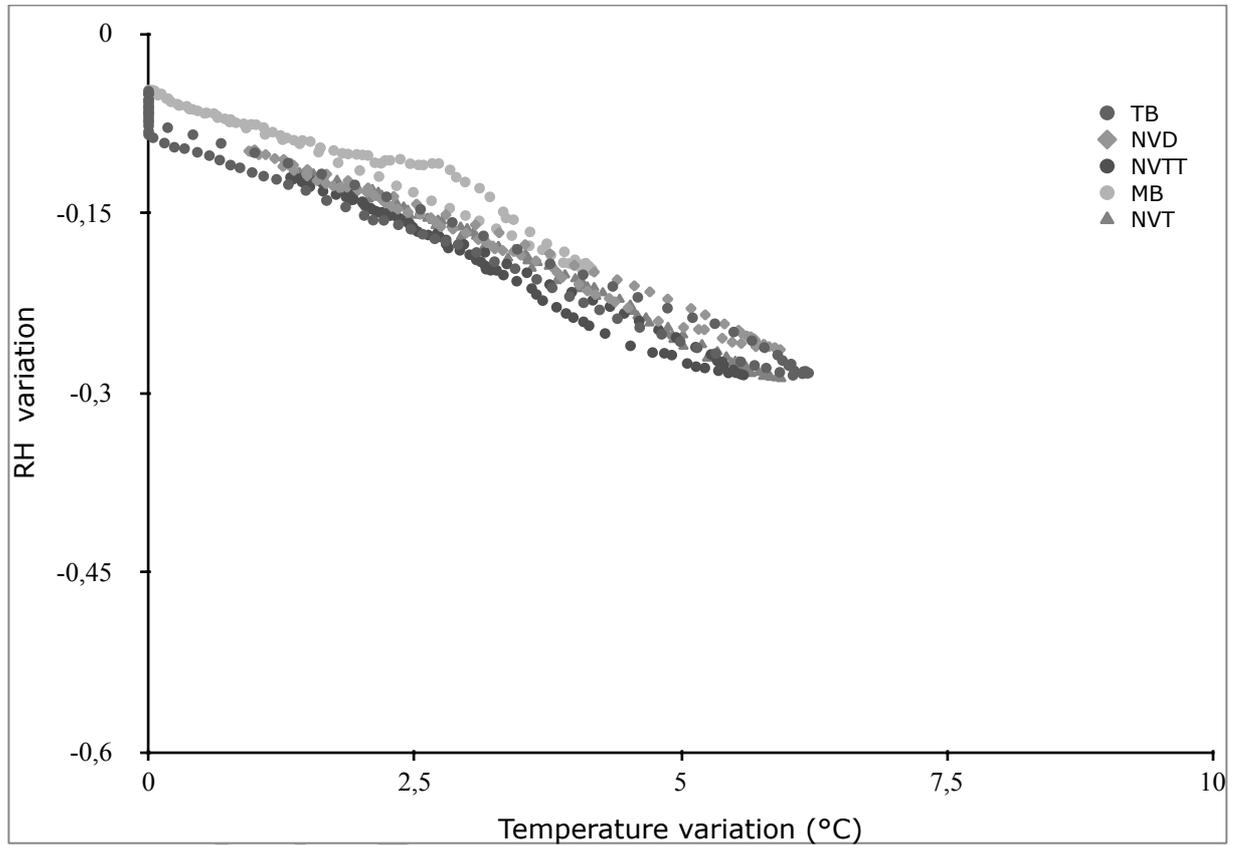


Figure 15 : Portrait de l'écart du cycle (Température/Humidité relative) avec la Zone de Confort des Oignons pendant une journée typique de 24 heures du mois de mai (Campagne en charge, saison humide chaude)

On observe que le bâtiment moderne semble se démarquer des autres constructions.

*Tableau 6: Tableau récapitulatif des mesures du mois de mai - Campagne en charge, saison humide chaude*

	<b>TB</b>	<b>MB</b>	<b>NV<sub>D</sub></b>	<b>NV<sub>T</sub></b>	<b>NV<sub>TT</sub></b>
#ZCO	00H00	00H00	00H00	00H00	00H00
#Temp	4H45	0H15	00H00	00H00	00H00
Maximum de température	36,2	34,2	35,9	35,9	35,6
Minimum de température	29,1	30,0	30,9	31,4	31,3
$\Delta T$	7,1	4,2	5,0	4,5	4,3
eTmax	6,2	4,2	5,9	5,9	5,6
eT	2,7	2,1	3,3	3,7	3,3
#RH	00H00	00H00	00H00	00H00	00H00
Maximum de RH	0,60	0,60	0,55	0,53	0,53
Minimum de RH	0,36	0,45	0,39	0,36	0,37
$\Delta RH$	0,24	0,15	0,17	0,17	0,16
eRHmax	-0,29	-0,20	-0,26	-0,29	-0,28
eRH	-0,17	-0,11	-0,18	-0,20	-0,20

#ZCO = Nombre d'heures dans la zone de conservation des oignons

#Temp = Nombre d'heures dans la plage de températures de conservation des oignons

$\Delta T$  = Variation de température

eTmax = Écart maximal de températures avec la plage de température de conservation des oignons

eT = Écart moyen de température avec la plage de température de conservation des oignons

#RH = Nombre d'heures dans la plage d'humidité relative de conservation des oignons

$\Delta RH$  = Variation d'humidité relative

eRHmax = Écart maximal d'humidité relative avec la plage d'humidité relative de conservation des oignons

eRH = Écart moyen d'humidité relative avec la plage d'humidité relative de conservation des oignons

Observations

Quel que soit le scénario étudié, le cycle (Température/Humidité relative) de chaque bâtiment :

- Il est **fortement** influencé par le cycle (Température/Humidité relative) extérieur
- Les écarts avec la plage d'humidité relative de conservation des oignons sont très similaires, voire identiques.
- Les variations dans la plage d'humidité relative de conservation des oignons sont très similaires, voire identiques.

TB/NV<sub>D</sub>,

- Le bâtiment traditionnel reste quotidiennement **4h15** de plus dans la plage de températures de conservation des oignons que dans la voûte nubienne double.
- L'écart de variation de température dans une journée est **42 %** plus grand dans le bâtiment traditionnel que dans la voûte nubienne double.
- L'écart maximal de températures avec la plage de températures de conservation des oignons est de **0.3 °C** de plus dans le bâtiment traditionnel que dans la voûte nubienne double.

MB/NV<sub>TT</sub> :

- Le bâtiment moderne reste quotidiennement **0 h 15** de plus dans la plage de températures de conservation des oignons que dans la voûte nubienne triple épaisse.
- L'écart de variation de température dans une journée est **2 %** plus grand dans la voûte nubienne triple épaisse que dans le bâtiment moderne
- L'écart maximal de températures avec la plage de températures de conservation des oignons est de **0.6 °C** de plus dans la voûte nubienne triple épaisse que dans le bâtiment moderne

NV<sub>D</sub>/NV<sub>TT</sub> :

- L'écart de variation de température dans une journée est **17 %** plus grand dans la voûte nubienne double que dans la voûte nubienne triple épaisse
- L'écart maximal de températures avec la plage de températures de conservation des oignons est au moins de **0.4 °C** de plus dans la voûte nubienne double que dans la voûte nubienne triple épaisse

NV<sub>T</sub>/NV<sub>TT</sub> :

- L'écart de variation de température dans une journée est **6 %** plus grand dans la voûte nubienne triple que dans la voûte nubienne triple épaisse
- L'écart maximal de températures avec la plage de températures de conservation des oignons est de **0.1 °C** de plus dans la voûte nubienne triple que dans la voûte nubienne triple épaisse

### **5.2.2. Étude quantitative :**

Les résultats de comparaison de la performance des différents bâtiments sont presque les mêmes pour les 11 semaines. Ainsi nous allons présenter **l'étude pour la semaine 1** de la campagne de mesure. Nous donnerons juste une **comparaison pour les autres semaines**

#### **5.2.2.1. Étude des mesures en charge sur les silos de conservation de l'oignon pendant la Saison humide chaude. Semaine 1 du 2014-05-01 au 2014-05-07**

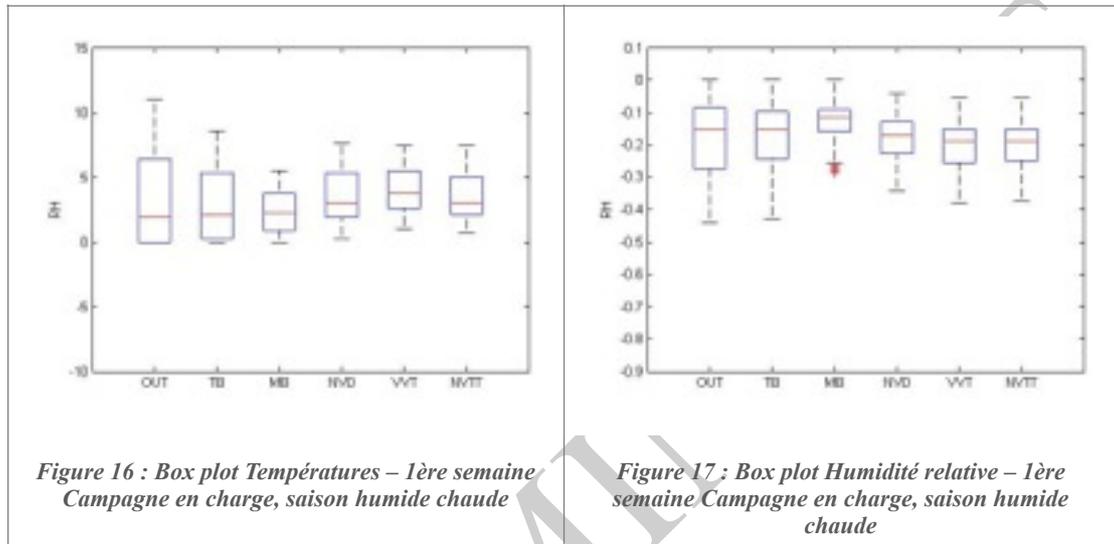
À partir de maintenant les mesures d'humidité relative et de températures de l'étude en charge sur les silos de conservation de l'oignon pendant la Saison humide chaude sont :

- Pour les mesures d'humidité relative : L'écart entre la valeur mesurée et la plage d'humidité relative de conservation de l'oignon.
- Pour les mesures de températures : L'écart entre la valeur mesurée et la plage de températures de conservation de l'oignon.

Les calculs prennent en compte toutes les valeurs mesurées soit 672 valeurs par semaine d'étude pour la température et 672 valeurs par semaine d'étude pour l'humidité relative.

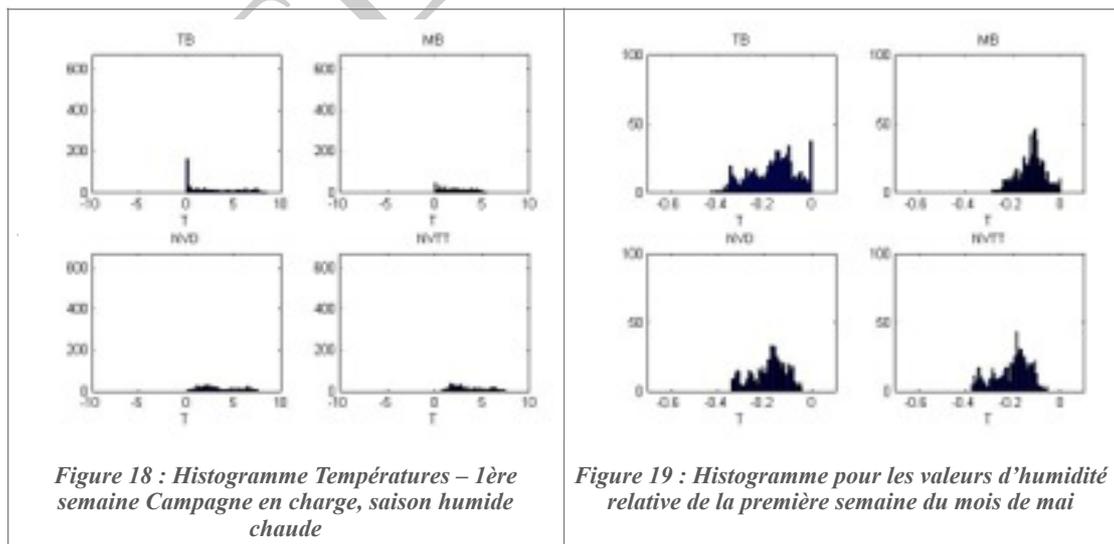
### Box plot

On réalise un « Box plot » pour les mesures d'humidité relative et de températures pour se donner une idée de la situation.

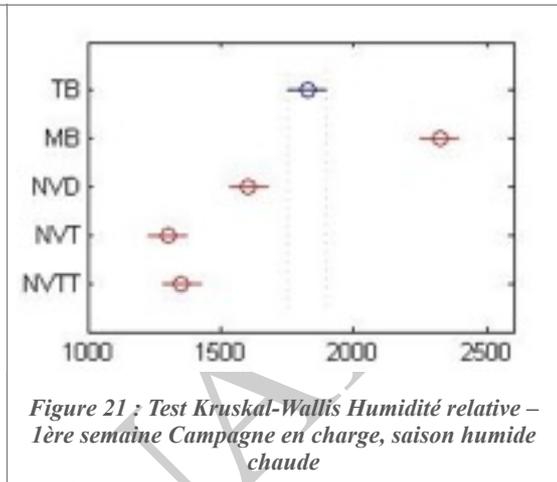
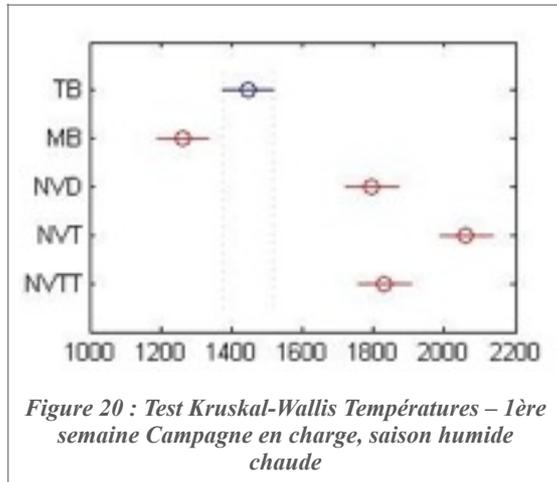


### Histogramme

On réalise un « histogramme » pour les mesures d'humidité relative et de températures



**Kruskal-Wallis**

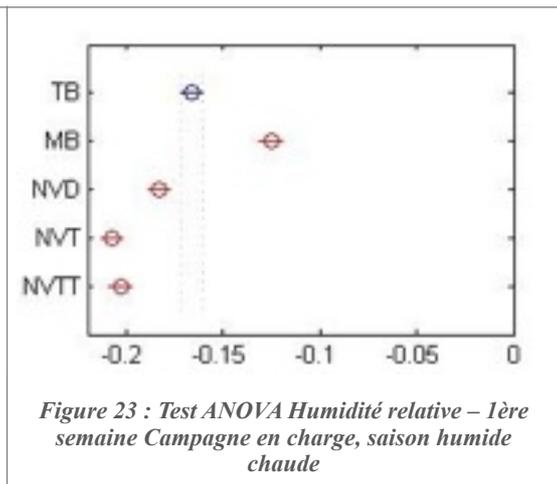
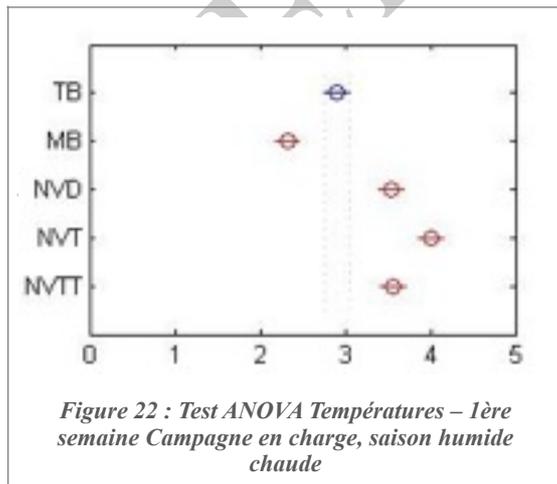


Pour la température la graduation se lit du moins d'écart avec la plage de températures de conservation des oignons à gauche au plus d'écart à droite.

Pour l'humidité relative, la graduation se lit du moins d'écart avec la plage d'humidité relative de conservation des oignons à droite au plus d'écart à gauche.

**ANOVA**

Pour augmenter la certitude de l'analyse statistique, nous allons effectuer le Test ANOVA (Test avec des valeurs Gaussiennes) avec les données moyennes :



On observe que les données sont similaires avec notre Test Kruskal-Wallis!

**Wilcoxon Rank Sum Test**

Pour vérifier s'il y a un écart significatif entre nos différents bâtiments 2 à 2 nous allons effectuer le Test **Wilcoxon Rank Sum Test** (Test avec des valeurs Non gaussiennes)

*Tableau 7 : pValue avec le Wilcoxon Rank Sum Test Températures – 1ère semaine Campagne en charge, saison humide chaude*

C3S1	TB	MB	NVD	NVT	NVTT
TB		0.2737	0	0	0
MB			0	0	0
NVD				0	0.4294
NVT					0
NVTT					

*Tableau 8 : pValue avec le Wilcoxon Rank Sum Test Humidité relative – 1ère semaine Campagne en charge, saison humide chaude*

C3S1	TB	MB	NVD	NVT	NVTT
TB		0	0	0	0
MB			0	0	0
NVD				0	0
NVT					0.2574
NVTT					

**Two Sample T-Test**

Pour augmenter la certitude de l'analyse statistique nous allons effectuer le Test **Two Sample t-test** (Test avec des valeurs gaussiennes) :

*Tableau 9 : pValue avec Two Sample t-test Températures – 1ère semaine Campagne en charge, saison humide chaude*

C3S1	TB	MB	NVD	NVT	NVTT
TB		0	0	0	0

MB			0	0	0
NVD				0	0.8471
NVT					0
NVTT					

*Tableau 10 : pValue avec Two Sample t-test Humidité relative – 1ère semaine Campagne en charge, saison humide chaude*

C3S1	TB	MB	NVD	NVT	NVTT
TB		E-0	0	0	0
MB			0	0	0
NVD				0	0
NVT					0.2733
NVTT					

**Observations**

**On définit qu'il y a, un écart significatif si pValue > 0,05**

**C'est-à-dire il y a un écart à 95 %**

On peut ainsi dire :

- Qu'il y a bien un écart significatif entre le bâtiment traditionnel et la voûte nubienne double pour l'humidité relative et la température.
- Qu'il y a bien un écart significatif entre le bâtiment moderne et la voûte nubienne triple (épaisse ou non) pour l'humidité relative et la température.
- Qu'il y a bien un écart significatif entre la voûte nubienne double et la voûte nubienne triple (épaisse ou non) pour l'humidité relative et la température.
- Qu'il y a bien un écart significatif entre la voûte nubienne triple et la voûte nubienne triple épaisse pour la température.
- Mais qu'il n'y a pas d'écart significatif entre la voûte nubienne triple et la voûte nubienne triple épaisse pour l'humidité relative.

À la fin de cette étude, l'on peut dire que statistiquement pour ce qui est de la performance de la construction vis-à-vis de l'écart avec la zone de confort des oignons pour la Semaine 1 du 2014-05-01 au 2014-05-07 :

**MB > NVTT/NVT soit, le bâtiment moderne est plus performant que les différentes voûtes nubiennes triples.**

**TB>NVD, soit le bâtiment traditionnel est plus performant que la voûte nubienne double.**

**NVD > NVTT > NVT soit, la voûte nubienne double est plus performante que la voûte nubienne triple épaisse qui est plus performante que la voûte nubienne triple simple.**

**5.2.2.2. Étude des mesures en charge sur les silos de conservation de l'oignon pendant la Saison humide chaude. Semaine 1 à 11. (Comparaison des résultats)**

**Résultats observés pour les 11 semaines de campagne en charge :**

- TB/NV<sub>D</sub>,

TB > NV<sub>D</sub>                      8 fois sur 11, il y a un écart significatif pour l'humidité relative  
TB > NV<sub>D</sub>                      7 fois sur 11, il y a un écart significatif pour la température

- MB/(NV<sub>TT</sub>, NV<sub>T</sub>):

MB > (NV<sub>TT</sub>, NV<sub>T</sub>)        11 fois sur 11, il y a un écart significatif pour l'humidité relative  
MB > (NV<sub>TT</sub>, NV<sub>T</sub>)        11 fois sur 11, il y a un écart significatif pour la température

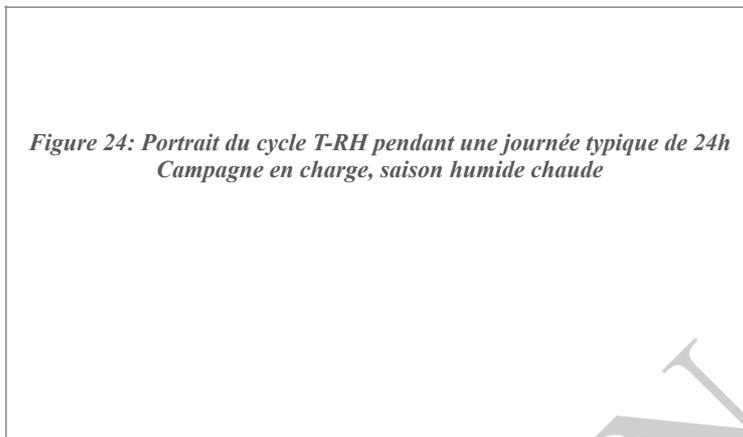
- NV<sub>D</sub>/(NV<sub>TT</sub>, NV<sub>T</sub>):

NV<sub>D</sub> > (NV<sub>TT</sub>, NV<sub>T</sub>)    9 fois sur 11, il y a un écart significatif pour l'humidité relative  
NV<sub>D</sub> > NV<sub>T</sub>                    11 fois sur 11, il y a un écart significatif pour la température  
NV<sub>D</sub>                            Il n'y a pas d'écart significatif avec NV<sub>TT</sub> pour la température

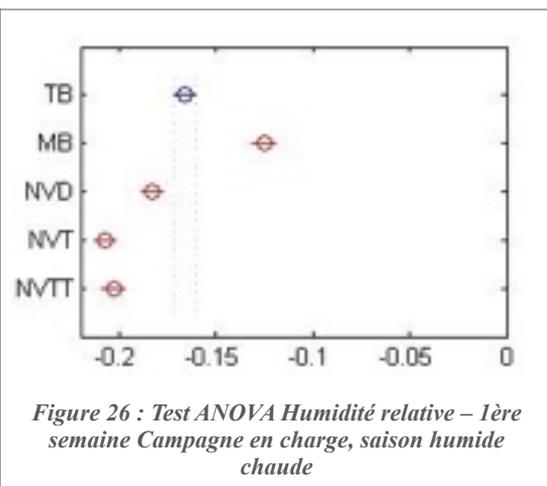
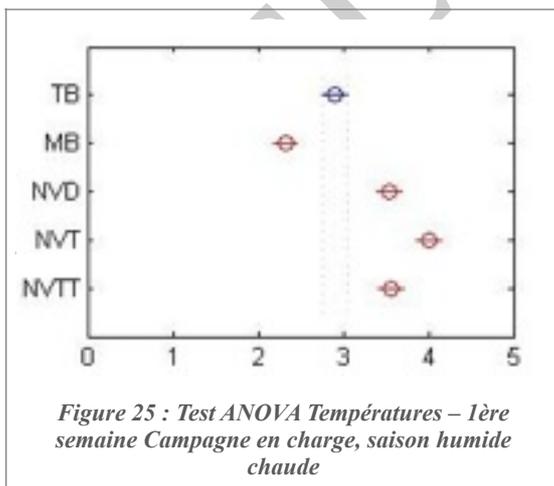
- NV<sub>T</sub>/NV<sub>TT</sub>:

NV<sub>T</sub>                            Il n'y a pas d'écart significatif avec NV<sub>TT</sub> pour l'humidité relative  
NV<sub>TT</sub> > NV<sub>T</sub>                10 fois sur 11, il y a un écart significatif pour la température

### 5.3. Analyse de l'étude statistique des mesures des bâtiments en charge pour les oignons



Pendant la campagne en charge le cycle (Température/Humidité relative) de chaque bâtiment est fortement influencé par le cycle de Température/Humidité relative extérieur. Ainsi l'écart des grandeurs de températures et d'humidités relatives est faible entre chaque bâtiment. Lorsque l'on avance dans la saison de stockage le cycle de Température/Humidité relative se rapproche de la Zone idéale de conservation des Oignons jusqu'à l'atteindre en fin de campagne. La différence notable que nous pouvons noter dans notre étude qualitative est au niveau de l'intervalle de variation. Il y a 42 % de plus de variations de température dans le bâtiment traditionnel que dans celui en voûte nubienne double.



**Le bâtiment moderne est plus performant que les différentes voûtes nubiennes triples. Le bâtiment traditionnel est plus performant que la voûte nubienne double. La voûte nubienne double est plus performante que la voûte nubienne triple épaisse qui est plus performante que la voûte nubienne triple simple.**

## 6. ÉTUDE DES MESURES DES BÂTIMENTS À VIDE

Tableau 11 : Scénarios de mesures pour les bâtiments vides

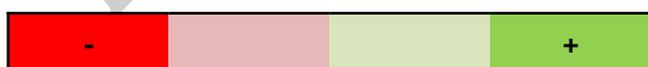
	Date	Code	Campagnes et scénarios	north NVp	south NVp	NVr	north NVrr	center NVrr	south NVrr	TB	TBp	MB	TB out	MB out	NV out
Campagne 1	2014-02-02 AU 2014-02-08	C151	Mesures à vide des silos de conservation de l'oignon - Saison sèche froide. Tous les ouvrants fermés / jours et nuits												
	2014-02-09 AU 2014-02-15	C152	Mesures à vide des silos de conservation de l'oignon - Saison sèche froide. Tous les ouvrants ouverts / jours et nuits												
	2014-02-16 AU 2014-02-22	C153	Mesures à vide des silos de conservation de l'oignon - Saison sèche froide. Tous les ouvrants fermés la journée / ouverts la nuit												
	2014-02-23 AU 2014-03-01	C154a	Mesures à vide des silos de conservation de l'oignon - Saison sèche froide. Tous les ouvrants ouverts fermés la journée / ouverts la nuit - avec ventilation mécanique pendant le jour												
	2014-03-02 AU 2014-03-08	C154b	Mesures à vide des silos de conservation de l'oignon - Saison sèche froide. Tous les ouvrants ouverts fermés la journée / ouverts la nuit - avec ventilation mécanique pendant la nuit												
Campagne 2	2014-03-09 AU 2014-03-15	C251	Mesures à vide des silos de conservation de l'oignon - Saison sèche chaude. Tous les ouvrants fermés / jours et nuits												
	2014-03-16 AU 2014-03-22	C252	Mesures à vide des silos de conservation de l'oignon - Saison sèche chaude. Tous les ouvrants ouverts / jours et nuits												
	2014-03-23 AU 2014-03-29	C253	Mesures à vide des silos de conservation de l'oignon - Saison sèche chaude. Tous les ouvrants fermés la journée / ouverts la nuit												
	2014-03-30 AU 2014-04-05	C254a	Mesures à vide des silos de conservation de l'oignon - Saison sèche chaude. Tous les ouvrants ouverts fermés la journée / ouverts la nuit - avec ventilation mécanique pendant le jour												
	2014-04-06 AU 2014-04-12	C254b	Mesures à vide des silos de conservation de l'oignon - Saison sèche chaude. Tous les ouvrants ouverts fermés la journée / ouverts la nuit - avec ventilation mécanique pendant la nuit												

Les cases hachurées représentent les données que nous avons.

### 6.1. Évaluation du comportement des données hygrométriques

Ci-dessous sont représentées les températures et les humidités relatives minimales, moyennes et maximales ainsi que l'amplitude moyenne des températures et des humidités relatives sur la période d'instrumentation.

		OUT	TB	MB	NVD	NVT T
Température sur la période	Maximale	46,1	42,2	39,3	41,1	40,7
	Minimale	14,9	19,0	22,9	22,8	22,0
	Moyenne	32,3	32,9	30,6	33,2	32,7
	amplitude maximale journalière (T max - T min)	22,9	15,8	10,0	10,5	9,2
	amplitude moyenne journalière (T max - T min)	16,3	11,6	6,0	6,3	5,7
Humidité relative sur la période	Maximale	0,80	0,70	0,63	0,60	0,56
	Minimale	0,04	0,05	0,14	0,11	0,06
	Moyenne	0,22	0,22	0,40	0,27	0,25
	amplitude maximale journalière (RH max - RH min)	0,67	0,56	0,46	0,45	0,44
	amplitude moyenne journalière (RH max - RH min)	0,27	0,20	0,24	0,21	0,22



Instrumentation	6720	mesures
	70	jours

Ces analyses permettent de mettre en évidence la forte inertie thermique des bâtiments en Voûte nubienne et notamment celle de la voûte nubienne triple épaisse pour la période des mesures à vide.

## 6.2. Évaluation du comportement des données hygrométriques vis-à-vis de la Zone de conservation des oignons.

### 6.2.1. Étude qualitative

Dans un premier temps les données brutes ont été traitées pour tirer le **portrait typique d'une journée de 24 heures** à l'intérieur de la campagne de mesures. Les observations porteront donc sur cette journée typique. (Moyenne de chaque ¼ d'heure à chaque même horaire t)

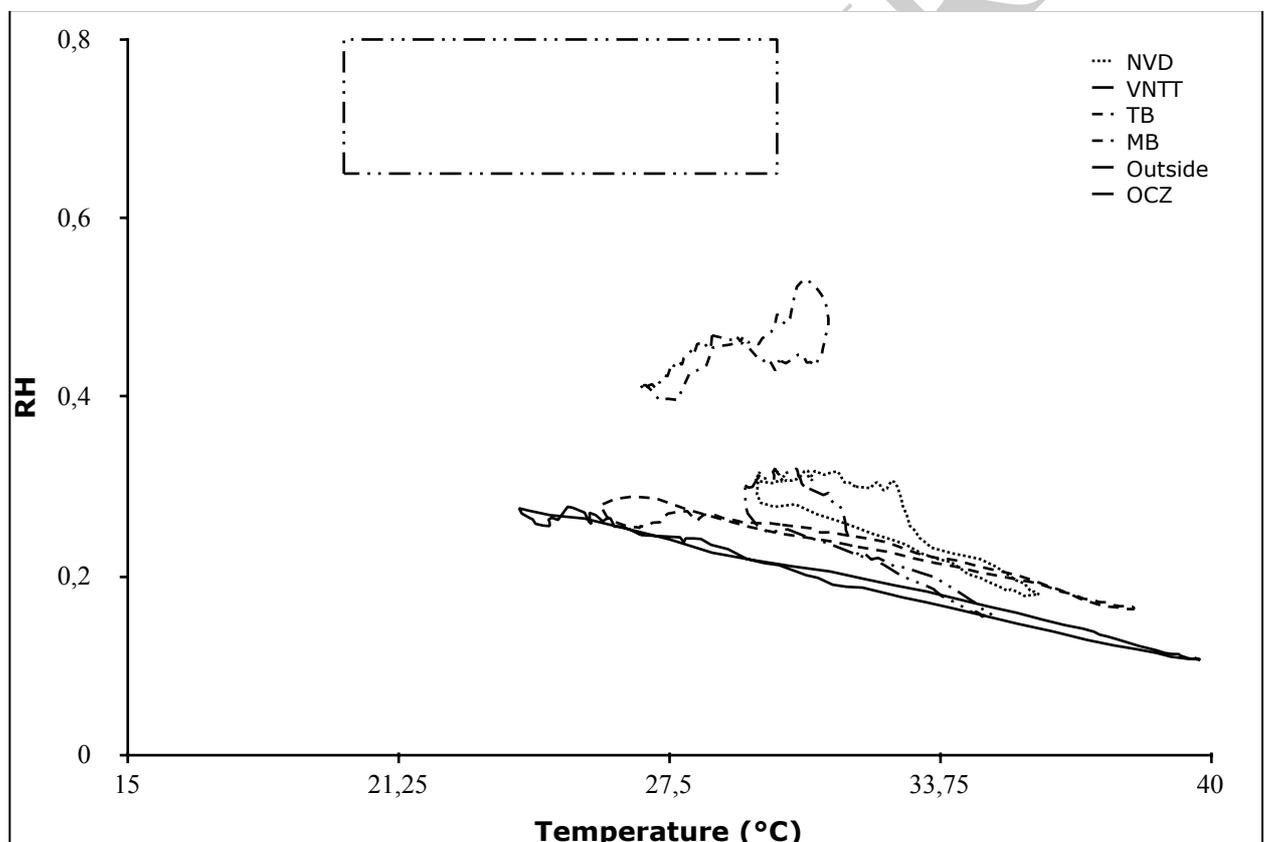
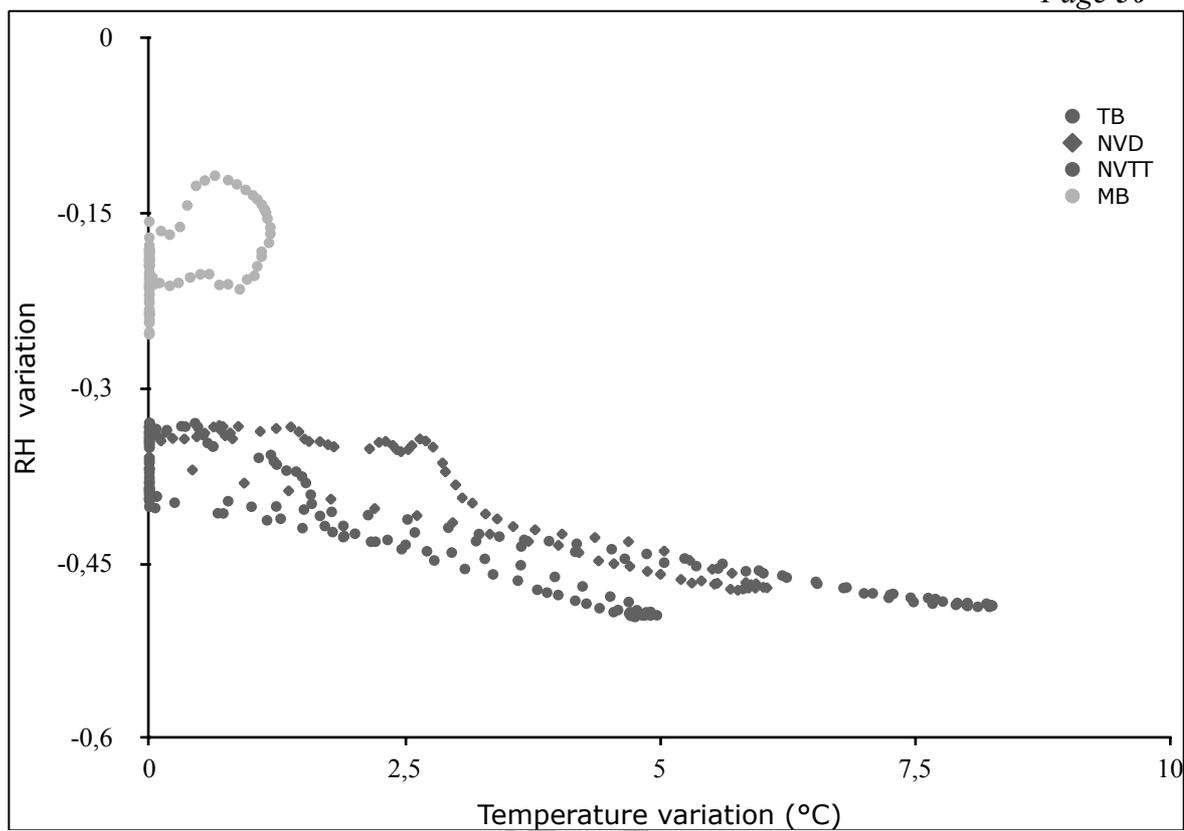


Figure 27 : Portrait du cycle (Température/Humidité relative) par rapport à la Zone de Confort des Oignons pendant une journée typique de 24 heures de la semaine C2S1

Quel que soit le bâtiment étudié, le cycle (Température/Humidité relative) de chaque bâtiment :

- Il n'atteint pas la Zone de conservation des oignons définie.

Dans un second temps les données de la journée type ont été traitées pour tirer le portrait typique de l'ÉCART entre le Cycle (Température/Humidité relative) et la zone de conservation des oignons.



On observe que le bâtiment moderne semble se démarquer des autres constructions.

PRELIMINAIRE

*Tableau 12: Tableau récapitulatif des mesures de C2S1 pour ZCO*

	<b>TB</b>	<b>MB</b>	<b>NV<sub>D</sub></b>	<b>NV<sub>TT</sub></b>
#ZCO	00H00	00H00	00H00	00H00
#Temp	8H45	15H15	2H45	6H00
Maximum de temperature	38,3	31,2	36,1	35,0
Minimum de temperature	25,9	26,8	29,5	29,2
$\Delta T$	12,4	4,4	6,6	5,8
eTmax	8,3	1,2	6,1	5,0
eT	3,3	0,3	2,7	2,0
#RH	00H00	00H00	00H00	00H00
Maximum de RH	0,29	0,53	0,32	0,32
Minimum de RH	0,16	0,40	0,18	0,15
$\Delta RH$	0,13	0,14	0,14	0,17
eRHmax	-0,49	-0,25	-0,47	-0,50
eRH	-0,43	-0,20	-0,39	-0,41

#ZCO = Nombre d'heures dans la zone de conservation des oignons

#Temp = Nombre d'heures dans la plage de températures de conservation des oignons

$\Delta T$  = Variation de température

eTmax = Écart maximal de températures avec la plage de température de conservation des oignons

eT = Écart moyen de température avec la plage de température de conservation des oignons

#RH = Nombre d'heures dans la plage d'humidité relative de conservation des oignons

$\Delta RH$  = Variation d'humidité relative

eRHmax = Écart maximal d'humidité relative avec la plage d'humidité relative de conservation des oignons

eRH = Écart moyen d'humidité relative avec la plage d'humidité relative de conservation des oignons

### Observations

Quel que soit le scénario étudié, le cycle (Température/Humidité relative) de chaque bâtiment :

- Il est **fortement** influencé par le cycle (Température/Humidité relative) extérieur
- L'écart avec la plage d'humidité relative de conservation des oignons est très similaire, voire identique. (sauf pour le bâtiment moderne)
- Les variations dans la plage d'humidité relative de conservation des oignons sont très similaires, voire identiques.

TB/NV<sub>D</sub>,

- Le bâtiment traditionnel reste quotidiennement **6h** de plus dans la plage de températures de conservation des oignons que dans la voûte nubienne double.
- L'écart de variation de température dans une journée est **88 %** plus grand dans le bâtiment traditionnel que dans la voûte nubienne double.
- L'écart maximal de températures avec la plage de températures de conservation des oignons est de **2.1 °C** de plus dans le bâtiment traditionnel que dans la voûte nubienne double.

MB/NV<sub>TT</sub> :

- Le bâtiment moderne reste quotidiennement **9h15** de plus dans la plage de températures de conservation des oignons que dans la voûte nubienne triple épaisse.
- L'écart de variation de température dans une journée est **32 %** plus grand dans la voûte nubienne triple épaisse que le bâtiment moderne.
- L'écart maximal de températures avec la plage de températures de conservation des oignons est de **3.8 °C** de plus dans la voûte nubienne triple épaisse que dans le bâtiment moderne.

NV<sub>D</sub>/NV<sub>TT</sub> :

- L'écart de variation de température dans une journée est **14 %** plus grand dans la voûte nubienne double que dans la voûte nubienne triple épaisse.
- L'écart maximal de températures avec la plage de températures de conservation des oignons est de **1.1 °C** de plus dans la voûte nubienne double que dans la voûte nubienne triple épaisse.

### **6.2.2. Étude quantitative :**

Les résultats de comparaison de la performance des différents bâtiments sont presque les mêmes pour les 10 semaines. Ainsi nous allons présenter **l'étude pour la semaine 6 (C2S1)** de la campagne de mesure. Nous donnerons une **comparaison pour les autres semaines**.

**6.2.2.1. Étude des mesures à vide sur les silos de conservation de l'oignon pendant la Saison sèche. Semaine C2S1 du 2014-03-09 au 2014-03-15**

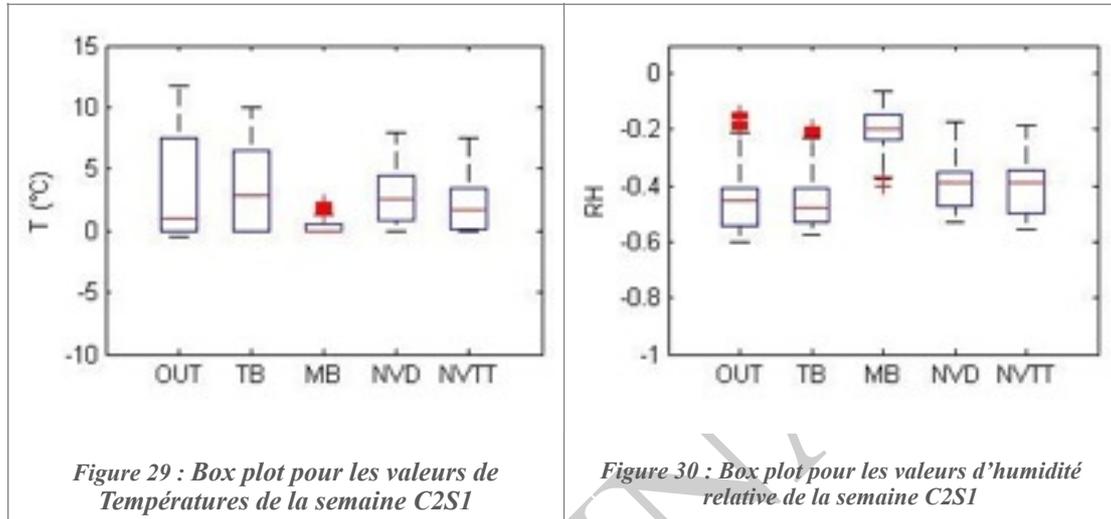
À partir de maintenant les mesures d'humidité relative et de températures de l'étude à vide sur les silos de conservation de l'oignon sont :

- Pour les mesures d'humidité relatives : L'écart entre la valeur mesurée et la plage d'humidité relative de conservation de l'oignon.
- Pour les mesures de températures : L'écart entre la valeur mesurée et la plage de températures de conservation de l'oignon.

Les calculs prennent en compte toutes les valeurs mesurées soit 672 valeurs par semaine d'étude pour la température et 672 valeurs par semaine d'étude pour l'humidité relative.

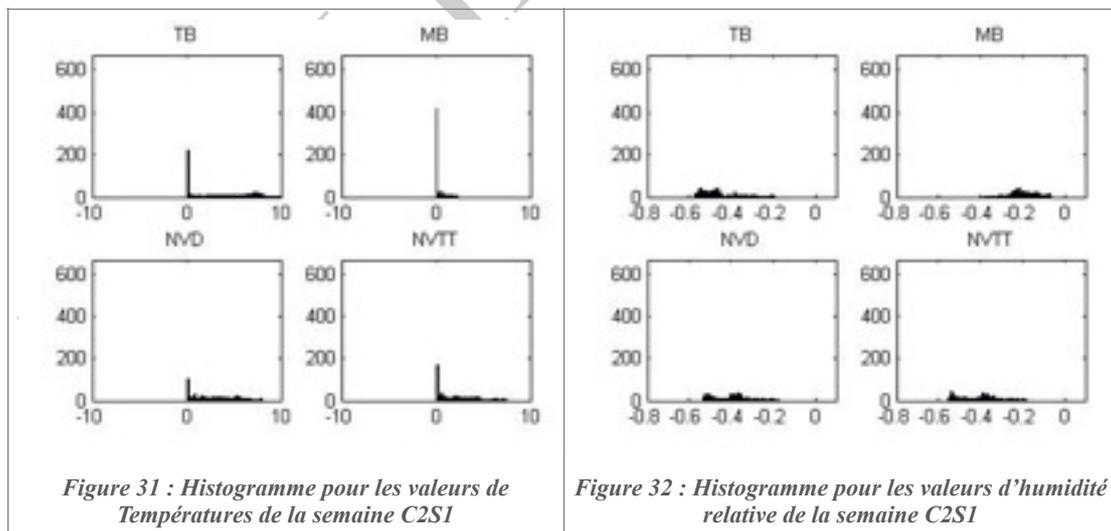
PRELIMINAIRE

**Box plot**



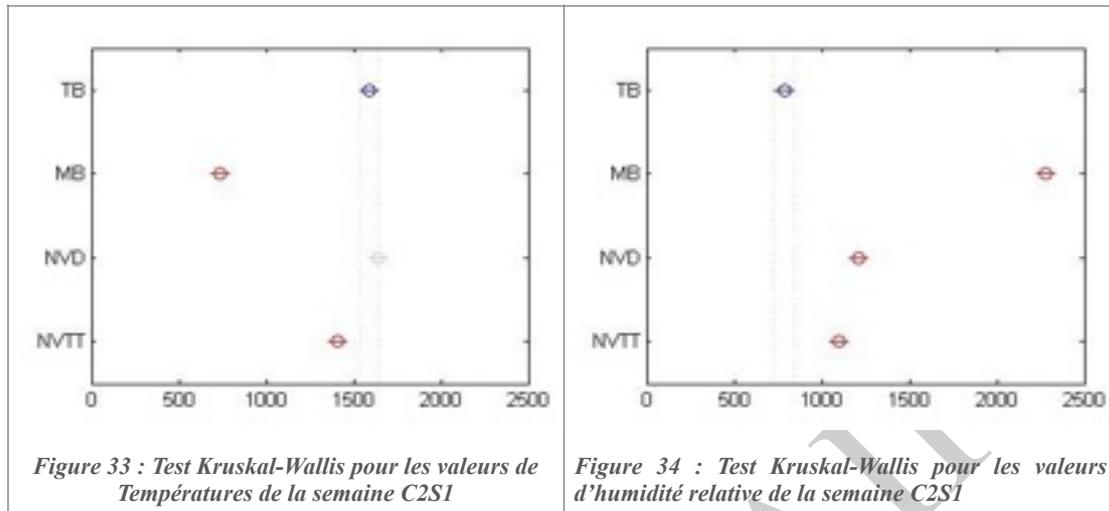
On remarque : Qu'il y a certaines données absurdes (croix rouge).

**Histogramme**



On remarque : Que le nombre de valeurs dans les plages de confort de température définie est important.

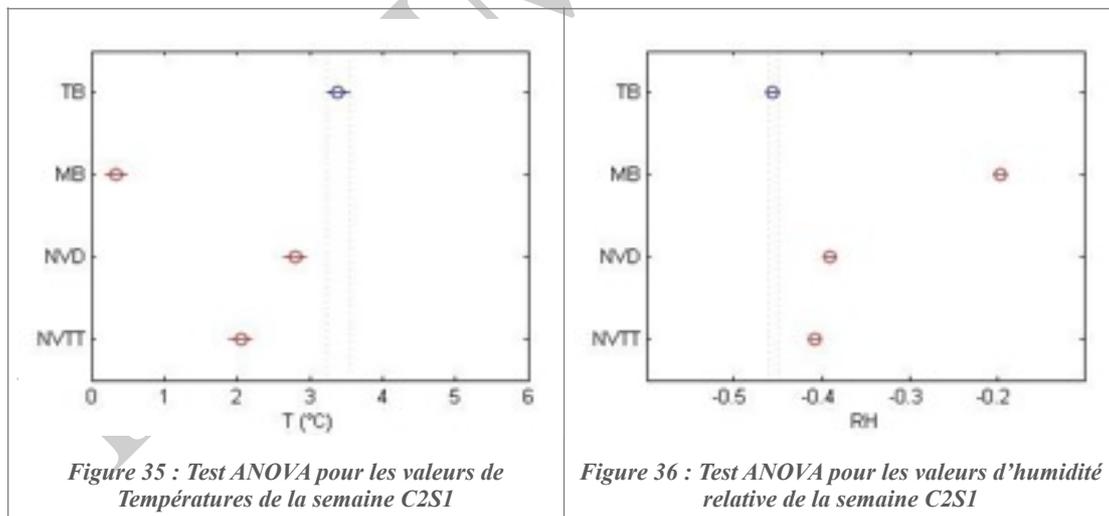
**Kruskal-Wallis**



Pour la température la graduation se lit du moins d'écart avec la plage de température de conservation des oignons à gauche au plus d'écart à droite.

Pour l'humidité relative, la graduation se lit du moins d'écart avec la plage d'humidité relative de conservation des oignons à droite au plus d'écart à gauche.

### ANOVA



**Wilcoxon Rank Sum Test**

*Tableau 13 : pValue avec le Wilcoxon Rank Sum Test avec les données de températures*

C2S1	TB	MB	NVD	NVTT
TB		0	0	0
MB			0	0
NVD				0.0015
NVT				

*Tableau 14 : pValue avec Wilcoxon Rank Sum Test avec les données d'humidité relative*

C2S1	TB	MB	NVD	NVTT
TB		0	0.1490	0
MB			0	0
NVD				0
NVT				

**Two Sample T-Test**

*Tableau 15 : pValue avec Two Sample t-test avec les données de températures*

C2S1	TB	MB	NVD	NVTT
TB		0	0	0
MB			0	0
NVD				0

NVTT				
------	--	--	--	--

Tableau 16 : pValue avec Two Sample t-test avec les données d'humidité relative

C2S1	TB	MB	NVD	NVTT
TB		0	0	0
MB			0	0
NVD				0.0013
NVTT				

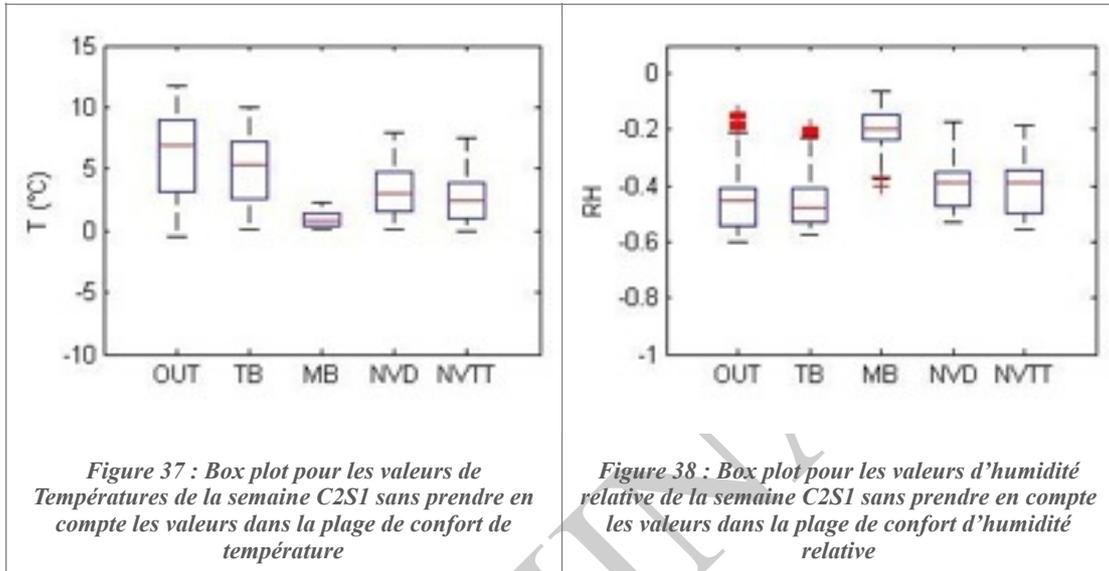
Les résultats du test Wilcoxon et du test T démontrent que les différences observées entre le test Kruskal Wallis et Anova sont significatifs. Ainsi les différents tests pour la température ne sont pas similaires ce qui veut dire que nos résultats pour la température donnent une série de données difficile à analyser. Nous allons donc effectuer à nouveau l'analyse statistique sans prendre en compte les valeurs dans les plages de confort de températures et d'humidité relative. Autrement dit nous allons enlever tous les Écarts de ZÉRO avec la plage de températures et d'humidité relative.

Voici le nombre de fois sur 672 mesures qu'il y a des valeurs dans les plages respectives de températures et d'humidité relative (Écart de ZÉRO).

sur 672	OUT_T	TB_T	MB_T	NVD_T	NVTT_T
C2S1	299	299	419	91	149

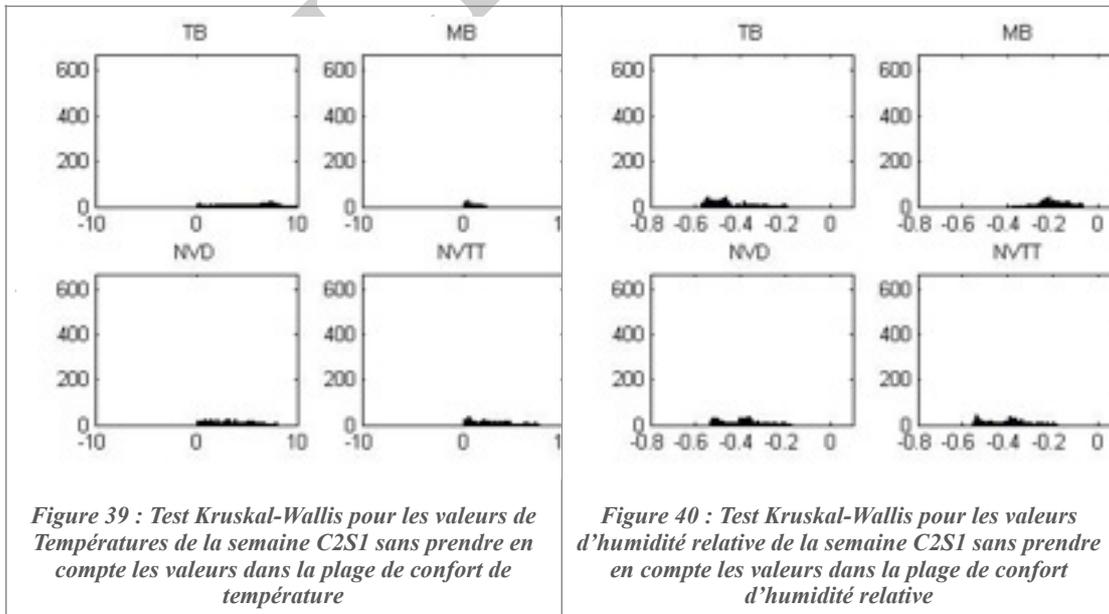
sur 672	OUT_RH	TB_RH	MB_RH	NVD_RH	NVTT_RH
C2S1	0	0	0	0	0

**Box plot**



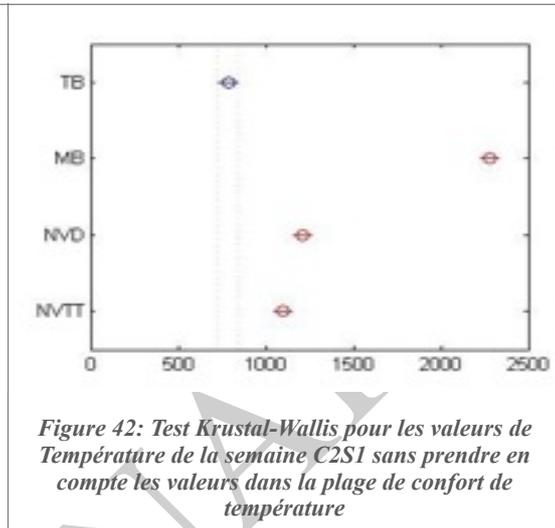
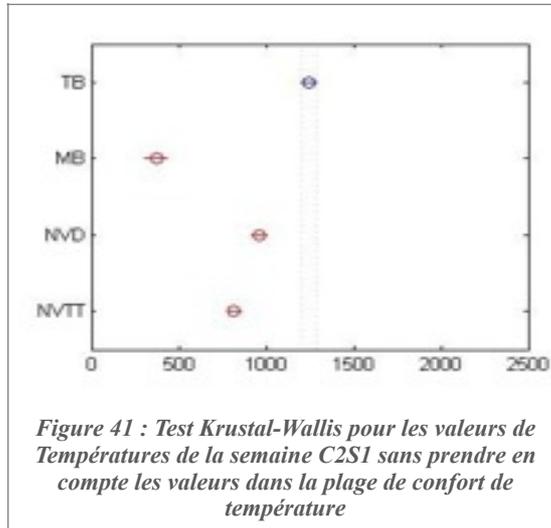
On remarque : Qu'il n'y a plus de données absurdes pour la température

**Histogramme**



On remarque : Qu'il n'y a plus de valeurs dans la plage de confort de température

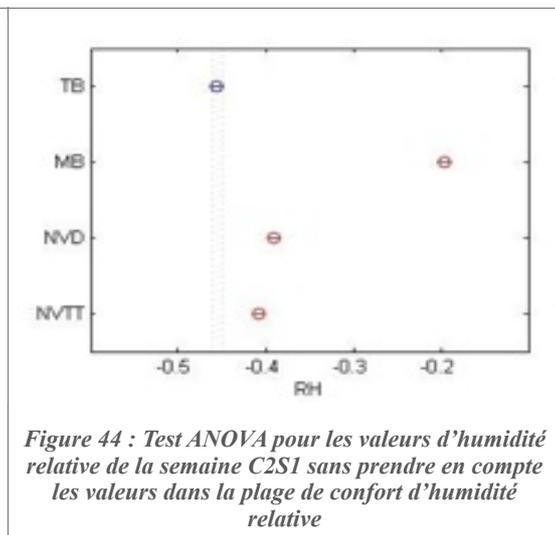
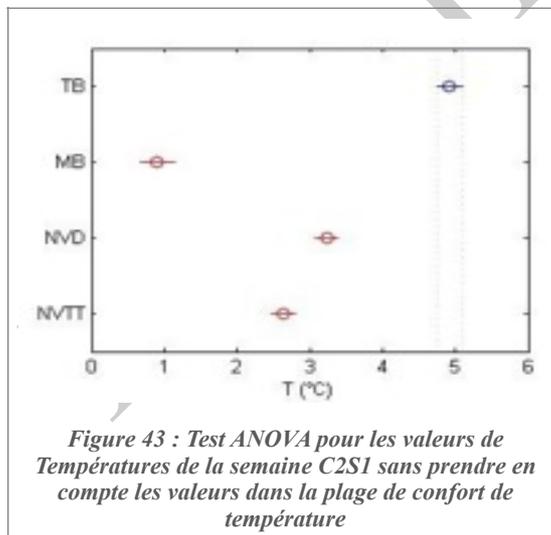
**Kruskal-Wallis**



Pour la température la graduation se lit du moins d'écart avec la plage de température de conservation des oignons à gauche au plus d'écart à droite.

Pour l'humidité relative, la graduation se lit du moins d'écart avec la plage d'humidité relative de conservation des oignons à droite au plus d'écart à gauche.

**ANOVA**



**Wilcoxon Rank Sum Test**

Tableau 17 : pValue avec le Wilcoxon Rank Sum Test avec les données de température sans prendre en compte les valeurs dans la plage de confort de températures

C2S1	TB	MB	NVD	NVTT
TB		0	0	0
MB			0	0
NVD				0
NVT				

Tableau 18 : pValue avec Wilcoxon Rank Sum Test avec les données d'humidité relative sans prendre en compte les valeurs dans la plage de confort d'humidité relative

C2S1	TB	MB	NVD	NVTT
TB		0	0	0
MB			0	0
NVD				0.0015
NVT				

**Two Sample T-Test**

Tableau 19 : pValue avec Two Sample t-test avec les données de température sans prendre en compte les valeurs dans la plage de confort de températures

C2S1	TB	MB	NVD	NVTT
TB		0	0	0
MB			0	0

NVD				0
NVTT				

C2S1	TB	MB	NVD	NVTT
TB		0	0	0
MB			0	0
NVD				0.0013
NVTT				

*Tableau 20: pValue avec Two Sample t-test avec les données d'humidité relative sans prendre en compte les valeurs dans la plage de confort d'humidité relative*

On remarque : que les données sont similaires avec notre Test Krustal Wallis!

Ainsi en ayant enlevé les valeurs dans les plages de confort de températures et d'humidité relative nous avons rendu la série de données plus simple à analyser. Autrement dit c'est bien les Écarts de ZÉRO avec la plage de températures et d'humidité relative qui perturbaient notre étude.

### Observations

**On définit qu'il y a, un écart significatif si pValue > 0,05**

**C'est-à-dire il y a un écart à 95 %**

On peut ainsi dire :

- Qu'il y a bien un écart significatif entre le bâtiment traditionnel et la voûte nubienne double pour l'humidité relative et la température.
- Qu'il y a bien un écart significatif entre le bâtiment moderne et la voûte nubienne triple épaisse pour l'humidité relative et la température.
- Qu'il y a bien un écart significatif entre la voûte nubienne double et la voûte nubienne triple épaisse pour l'humidité relative et la température.

**6.2.2.2. Étude des mesures à vide sur les silos de conservation de l'oignon.  
Semaine 1 à 10. (Comparaison des résultats)**

Avec les données d'humidité relative :

	Comparaison	Écart significatif de l'efficacité					
		NVTT>NVD		NVTT<NVD	100,0 %	NVTT=NVD	
<b>Campagne à vide ZCO RH KRUSTAL</b>	NVTT/MB	NVTT>MB		NVTT<MB	100,0 %	NVTT=MB	
	NVTT/TB	NVTT>TB	87,5 %	NVTT<TB		NVTT=TB	12,5 %
	NVD/MB	NVD>MB		NVD<MB	100,0 %	NVD=MB	
	NVD/TB	NVD>TB	100,0 %	NVD<TB		NVD=TB	
	MB/TB	MB>TB	100,0 %	MB<TB		MB=TB	

	Comparaison	Écart significatif de l'efficacité					
		NVTT>NVD		NVTT<NVD	100,0 %	NVTT=NVD	
<b>Campagne à vide ZCO RH ANOVA</b>	NVTT/MB	NVTT>MB		NVTT<MB	100,0 %	NVTT=MB	
	NVTT/TB	NVTT>TB	87,5 %	NVTT<TB		NVTT=TB	12,5 %
	NVD/MB	NVD>MB		NVD<MB	100,0 %	NVD=MB	
	NVD/TB	NVD>TB	100,0 %	NVD<TB		NVD=TB	
	MB/TB	MB>TB	100,0 %	MB<TB		MB=TB	

	Comparaison	Écart significatif de l'efficacité					
--	-------------	------------------------------------	--	--	--	--	--

<b>Campagne à vide ZCO RH SANS 0 KRUSTAL</b>	<b>NVTT/NVD</b>	NVTT>NVD		NVTT<NVD	100,0 %	NVTT=NVD	
	<b>NVTT/MB</b>	NVTT>MB		NVTT<MB	100,0 %	NVTT=MB	
	<b>NVTT/TB</b>	NVTT>TB	87,5 %	NVTT<TB		NVTT=TB	12,5 %
	<b>NVD/MB</b>	NVD>MB		NVD<MB	100,0 %	NVD=MB	
	<b>NVD/TB</b>	NVD>TB	100,0 %	NVD<TB		NVD=TB	
	<b>MB/TB</b>	MB>TB	100,0 %	MB<TB		MB=TB	

<b>Campagne à vide ZCO RH SANS 0 ANOVA</b>	<b>Comparaison</b>	<b>Écart significatif de l'efficacité</b>					
	<b>NVTT/NVD</b>	NVTT>NVD		NVTT<NVD	100,0 %	NVTT=NVD	
<b>NVTT/MB</b>	NVTT>MB		NVTT<MB	100,0 %	NVTT=MB		
<b>NVTT/TB</b>	NVTT>TB	100,0 %	NVTT<TB		NVTT=TB	12,5 %	
<b>NVD/MB</b>	NVD>MB		NVD<MB	100,0 %	NVD=MB		
<b>NVD/TB</b>	NVD>TB	100,0 %	NVD<TB		NVD=TB		
<b>MB/TB</b>	MB>TB	100,0 %	MB<TB		MB=TB		

Avec les données de températures :

Campagne à vide ZCOT ANOVA	Comparaison	Écart significatif de l'efficacité					
	NVTT/NVD	NVTT>NVD	100,0 %	NVTT<NVD		NVTT=NVD	
NVTT/MB	NVTT>MB		NVTT<MB	100,0 %	NVTT=MB		
NVTT/TB	NVTT>TB	87,5 %	NVTT<TB	12,5 %	NVTT=TB		
NVD/MB	NVD>MB		NVD<MB	100,0 %	NVD=MB		
NVD/TB	NVD>TB	66,7 %	NVD<TB		NVD=TB	33,3 %	
MB/TB	MB>TB	100,0 %	MB<TB		MB=TB		

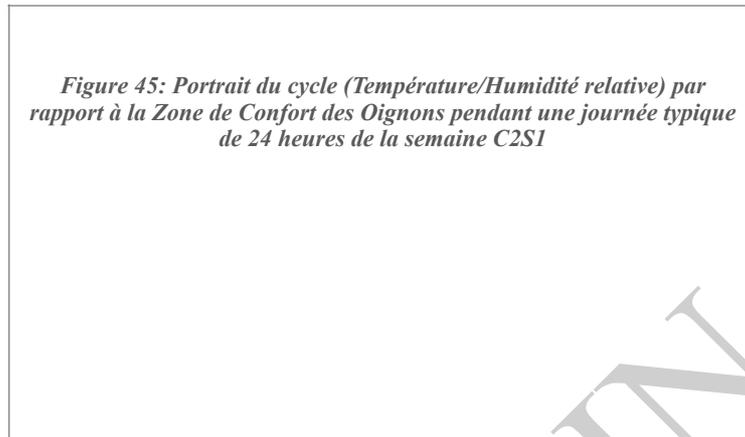
Campagne à vide ZCOT KRUSTAL	Comparaison	Écart significatif de l'efficacité					
	NVTT/NVD	NVTT>NVD	100,0 %	NVTT<NVD		NVTT=NVD	
NVTT/MB	NVTT>MB		NVTT<MB	100,0 %	NVTT=MB		
NVTT/TB	NVTT>TB	50,0 %	NVTT<TB	12,5 %	NVTT=TB	37,5 %	
NVD/MB	NVD>MB		NVD<MB	100,0 %	NVD=MB		
NVD/TB	NVD>TB	50,0 %	NVD<TB		NVD=TB	50,0 %	
MB/TB	MB>TB	100,0 %	MB<TB		MB=TB		

Campagne à vide ZCOT SANS 0	Comparaison	Écart significatif de l'efficacité					
	NVTT/NVD	NVTT>NVD	100,0 %	NVTT<NVD		NVTT=NVD	
NVTT/MB	NVTT>MB		NVTT<MB	100,0 %	NVTT=MB		
NVTT/TB	NVTT>TB	100,0 %	NVTT<TB		NVTT=TB		

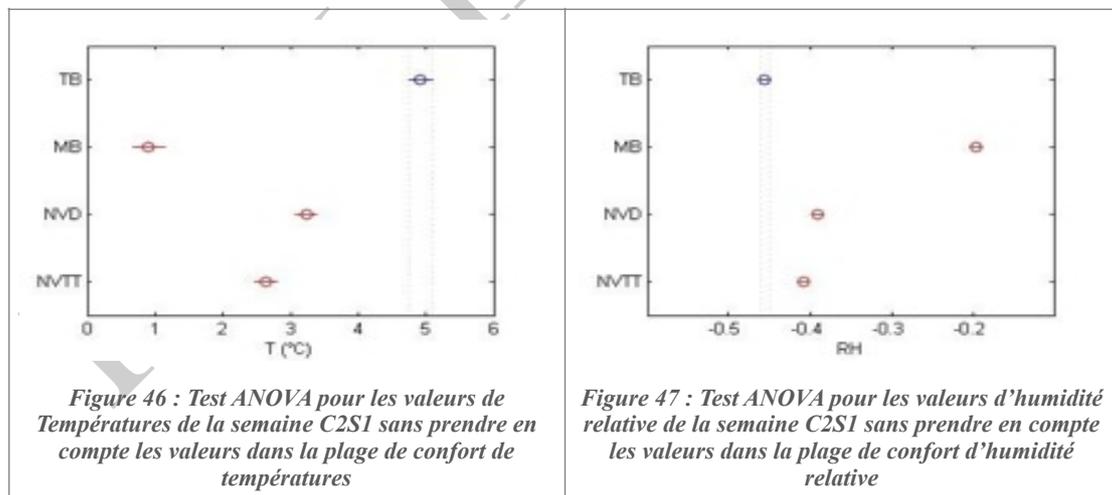
<b>KRUSTA L</b>	<b>NVD/MB</b>	NVD>MB		NVD<MB	100,0 %	NVD=MB	
	<b>NVD/TB</b>	NVD>TB	100,0 %	NVD<TB		NVD=TB	
	<b>MB/TB</b>	MB>TB	100,0 %	MB<TB		MB=TB	

	Comparai son	Écart significatif de l'efficacité					
		<b>NVTT/NVD</b>	NVTT>NV D	100,0 %	NVTT<NV D		NVTT=NV D
<b>Campagn e à vide ZCO T SANS 0 ANOVA</b>	<b>NVTT/MB</b>	NVTT>MB		NVTT<MB	100,0 %	NVTT=MB	
	<b>NVTT/TB</b>	NVTT>TB	100,0 %	NVTT<TB		NVTT=TB	
	<b>NVD/MB</b>	NVD>MB		NVD<MB	100,0 %	NVD=MB	
	<b>NVD/TB</b>	NVD>TB	83,3 %	NVD<TB		NVD=TB	16,7 %
	<b>MB/TB</b>	MB>TB	100,0 %	MB<TB		MB=TB	

### 6.3. Analyse de la performance des bâtiments et groupes de bâtiments à vide pour les oignons vis-à-vis de la Zone de conservation des oignons.



Pendant la campagne à vide lorsque l'on avance vers la saison humide le cycle de Température/Humidité relative se rapproche de la Zone idéale de conservation des Oignons, mais ne l'atteint pas. Le bâtiment traditionnel et le moderne restent nettement plus longtemps dans la plage de températures de conservation des oignons. Cependant les variations de température sont nettement plus élevées dans le bâtiment traditionnel que dans les voûtes nubiennes.



On peut dire que statistiquement pour ce qui est de la performance de la construction :

Vis-à-vis de l'écart avec la plage de confort de Températures :

**MB > NVTT/NVD ; NVTT/NVD > TB ; NVTT > NVD**

Vis-à-vis de l'écart avec la plage de confort d'humidité relative :

**MB > NVTT/NVD ; NVD > TB ; NVD > NVTT**

Vis-à-vis de l'écart avec la zone de conservation des oignons :

**MB > NVTT/NVD > TB ; NVD et NVTT sont proches.**

## 6.4. Évaluation du comportement des données hygrométriques vis-à-vis de la Zone de confort thermique pour les humains.

### 6.4.1. Étude qualitative

Dans un premier temps les données brutes ont été traitées pour tirer le **portrait typique d'une journée de 24 heures** à l'intérieur de la campagne de mesures. Les observations porteront donc sur cette journée typique. (Moyenne de chaque  $\frac{1}{4}$  d'heure à chaque même horaire t)

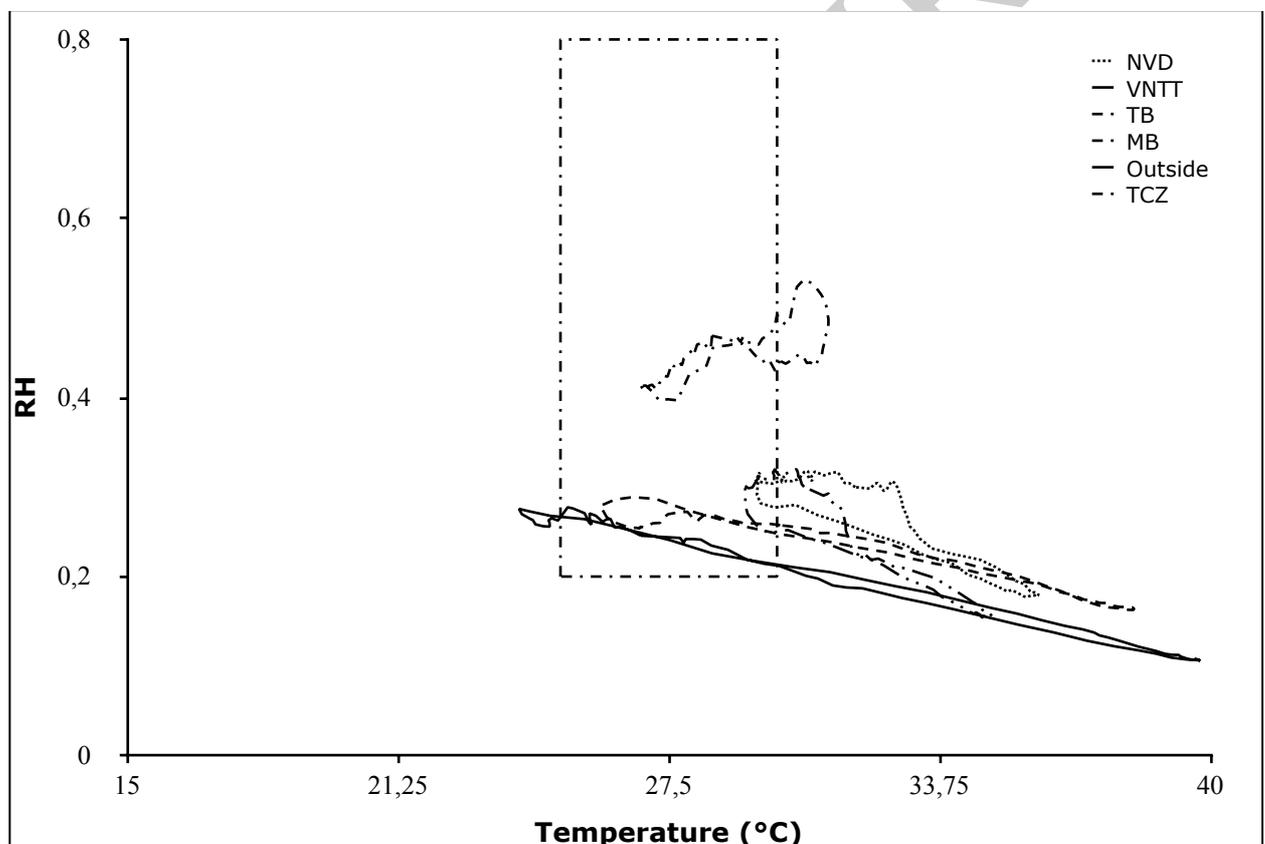


Figure 48: Portrait du cycle (Température/Humidité relative) par rapport à la Zone de Confort thermique pendant une journée typique de 24 heures de la semaine C2S1

Quel que soit le bâtiment étudié, le cycle (Température/Humidité relative) de chaque bâtiment :

- Il n'atteint pas la Zone de conservation des oignons définie.

Dans un second temps les données de la journée type ont été traitées pour tirer le portrait typique de l'ÉCART entre le Cycle (Température/Humidité relative) et la zone de confort thermique.

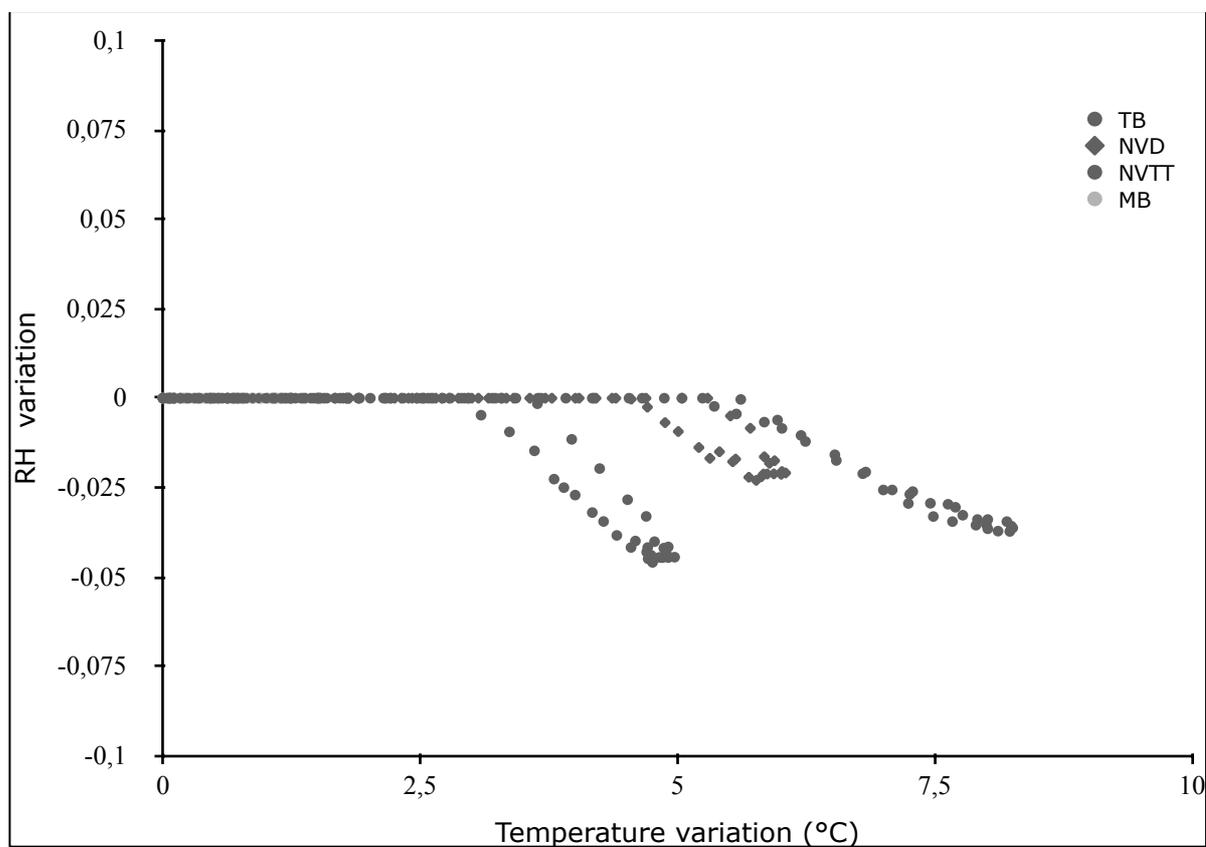


Figure 49 : Portrait de l'écart du cycle (Température/Humidité relative) avec la Zone de Confort thermique pendant une journée typique de 24 heures de la semaine C2S1

On observe que le bâtiment moderne semble se démarquer des autres constructions.

*Tableau 21: Tableau récapitulatif des mesures de C2S1 pour ZCT*

	<b>TB</b>	<b>MB</b>	<b>NV<sub>D</sub></b>	<b>NV<sub>TT</sub></b>
#ZCO	8H45	15H15	2H45	5H45
#Temp	8H45	15H15	2H45	5H45
Maximum de temperature	38,3	31,2	36,1	35,0
Minimum de temperature	25,9	26,8	29,5	29,2
$\Delta T$	12,4	4,4	6,6	5,8
eTmax	8,3	1,2	6,1	5,0
eT	3,3	0,3	2,7	2,0
#RH	15H30	24H00	18H15	16H30
Maximum de RH	0,29	0,53	0,32	0,32
Minimum de RH	0,16	0,40	0,18	0,15
$\Delta RH$	0,13	0,14	0,14	0,17
eRHmax	-0,04	0,00	-0,02	-0,05
eRH	-0,01	0,00	0,00	-0,01

#ZCT = Nombre d'heures dans la zone de CONFORT THERMIQUE

#Temp = Nombre d'heures dans la plage de températures de CONFORT THERMIQUE

$\Delta T$  = Variation de température

eTmax = Écart maximal de températures avec la plage de températures de CONFORT THERMIQUE

eT = Écart moyen de températures avec la plage de températures de CONFORT THERMIQUE

#RH = Nombre d'heures dans la plage d'humidité relative de CONFORT THERMIQUE

$\Delta RH$  = Variation d'humidité relative

eRHmax = Écart maximal d'humidité relative avec la plage d'humidité relative de CONFORT THERMIQUE

eRH = Écart moyen d'humidité relative avec la plage d'humidité relative de CONFORT THERMIQUE

### Observations

Quel que soit le scénario étudié, le cycle (Température/Humidité relative) de chaque bâtiment :

- Il est **fortement** influencé par le cycle (Température/Humidité relative) extérieur
- L'écart avec la plage d'humidité relative du confort thermique est très faible, voire inexistant.
- Les variations dans la plage d'humidité relative du confort thermique sont très similaires, voire identiques.

TB/NV<sub>D</sub>,

- Le bâtiment traditionnel reste quotidiennement **6h** de plus dans la plage de températures du confort thermique que dans la voûte nubienne double.
- L'écart de variation de température dans une journée est **88 %** plus grand dans le bâtiment traditionnel que dans la voûte nubienne double.
- L'écart maximal de températures avec la plage de température du confort thermique est de **2.2 °C** de plus dans le bâtiment traditionnel que dans la voûte nubienne double.

MB/NV<sub>TT</sub> :

- Le bâtiment moderne reste quotidiennement **9 h 30** de plus dans la plage de températures de confort thermique que dans la voûte nubienne triple épaisse.
- L'écart de variation de température dans une journée est **32 %** plus grand dans la voûte nubienne triple épaisse que dans le bâtiment moderne.
- L'écart maximal de températures avec la plage de températures du confort thermique est de **4.8 °C** de plus dans la voûte nubienne triple épaisse que dans le bâtiment moderne.

NV<sub>D</sub>/NV<sub>TT</sub> :

- L'écart de variation de température dans une journée est **14 %** plus grand dans la voûte nubienne double que dans la voûte nubienne triple épaisse.
- L'écart maximal de températures avec la plage de températures du confort thermique est de **0.8 °C** de plus dans la voûte nubienne double que dans la voûte nubienne triple épaisse.

### **6.4.2. Étude quantitative**

Les résultats de comparaison de la performance des différents bâtiments sont presque les mêmes pour les 10 semaines. Ainsi nous allons présenter **l'étude pour la semaine 6 (C2S1)** de la campagne de mesure. Nous donnerons une **comparaison pour les autres semaines**.

**6.4.2.1. Étude des mesures à vide sur les silos de conservation de l'oignon pendant la Saison sèche. Semaine C2S1 du 2014-03-09 au 2014-03-15**

À partir de maintenant les mesures d'humidité relative et de températures de l'étude à vide sur les silos de conservation de l'oignon sont :

- Pour les mesures d'humidité relatives : L'écart entre la valeur mesurée et la plage d'humidité relative de confort thermique.
- Pour les mesures de températures : L'écart entre la valeur mesurée et la plage de températures de confort thermique.

Les calculs prennent en compte toutes les valeurs mesurées soit 672 valeurs par semaine d'étude pour la température et 672 valeurs par semaine d'étude pour l'humidité relative.

**Box plot**

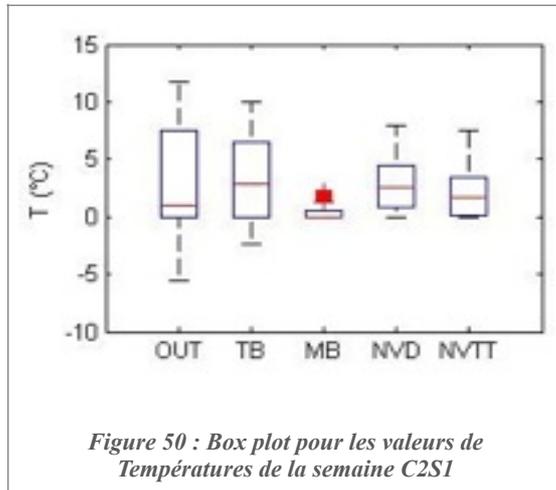


Figure 50 : Box plot pour les valeurs de Températures de la semaine C2S1

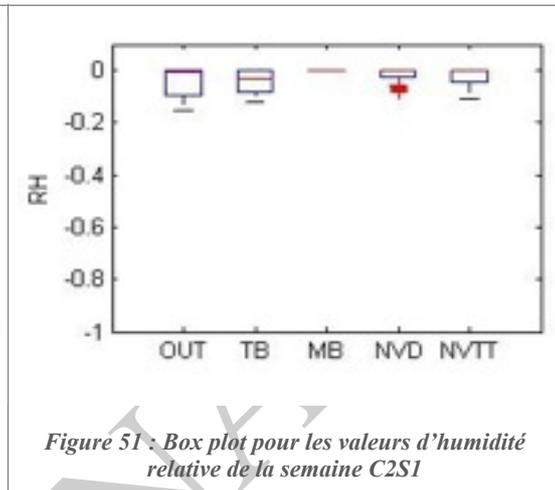


Figure 51 : Box plot pour les valeurs d'humidité relative de la semaine C2S1

- On remarque : Qu'il y a certaines données absurdes (croix rouge).  
Que le bâtiment moderne est à 100 % dans la plage de confort d'humidité relative.  
Que les données des voûtes nubiennes sont proches.  
Que les données du bâtiment traditionnel et extérieur sont proches.

**Histogramme**

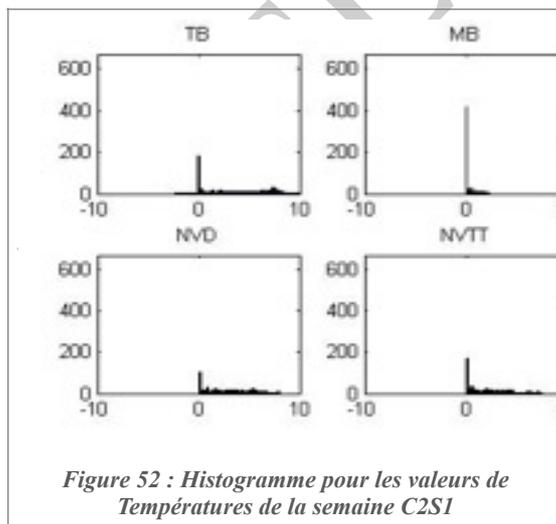


Figure 52 : Histogramme pour les valeurs de Températures de la semaine C2S1

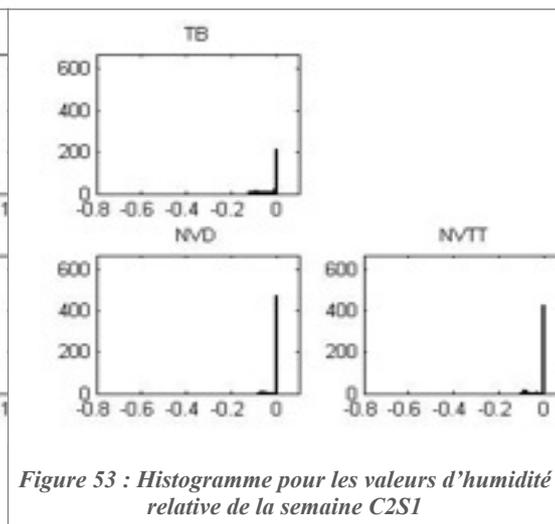


Figure 53 : Histogramme pour les valeurs d'humidité relative de la semaine C2S1

- On remarque : Que le nombre de valeurs dans les plages de confort de Température et d'humidité relative est important.

**Kruskal-Wallis**

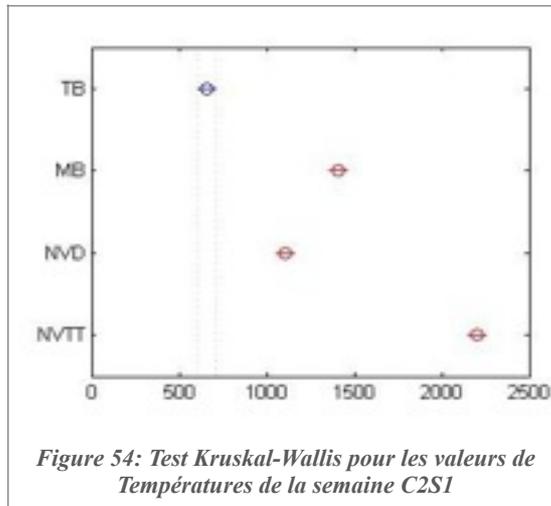


Figure 54 : Test Kruskal-Wallis pour les valeurs de Températures de la semaine C2S1

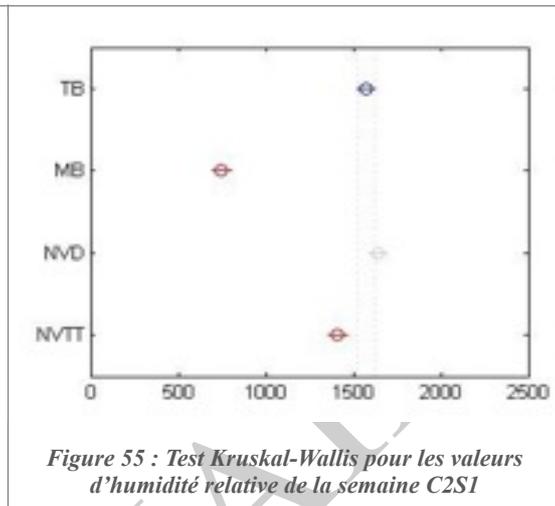


Figure 55 : Test Kruskal-Wallis pour les valeurs d'humidité relative de la semaine C2S1

Pour la température la graduation se lit du moins d'écart avec la plage de température de confort thermique à gauche au plus d'écart à droite.

Pour l'humidité relative, la graduation se lit du moins d'écart avec la plage d'humidité relative de confort thermique à droite au plus d'écart à gauche.

**ANOVA**

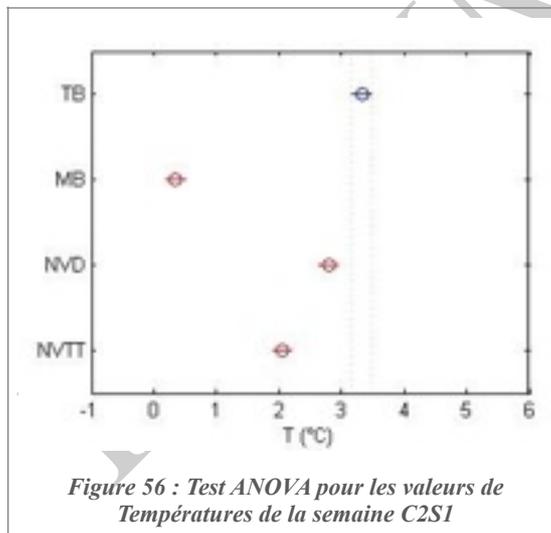


Figure 56 : Test ANOVA pour les valeurs de Températures de la semaine C2S1

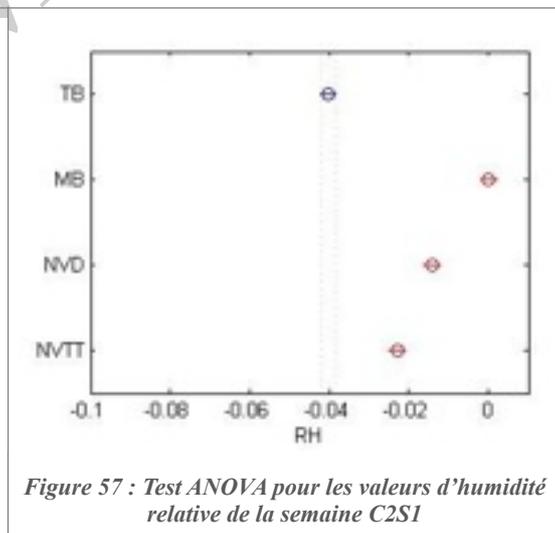


Figure 57 : Test ANOVA pour les valeurs d'humidité relative de la semaine C2S1

**Wilcoxon Rank Sum Test**

Tableau 22 : pValue avec le Wilcoxon Rank Sum Test avec les données de températures

C2S1	TB	MB	NVD	NVTT
TB		0	0	0

MB			0	0
NVD				0
NVT				

*Tableau 23 : pValue avec Wilcoxon Rank Sum Test avec les données d'humidité relative*

C2S1	TB	MB	NVD	NVTT
TB		0	0	0
MB			0	0
NVD				0
NVT				

**Two Sample T-Test**

*Tableau 24 : pValue avec Two Sample t-test avec les données de températures*

C2S1	TB	MB	NVD	NVTT
TB		0	0	0
MB			0	0
NVD				0
NVTT				

*Tableau 25 : pValue avec Two Sample t-test avec les données d'humidité relative*

C2S1	TB	MB	NVD	NVTT
TB		0	0	0

MB			0	0
NVD				0
NVTT				

PRELIMINAIRE

On remarque : Les résultats du test Wilcoxon et du test T démontrent que les différences observées entre le test Kruskal Wallis et Anova sont significatifs. Ainsi les différents Tests ne sont pas similaires ce qui veut dire que nos résultats donnent une série de données difficile à analyser.

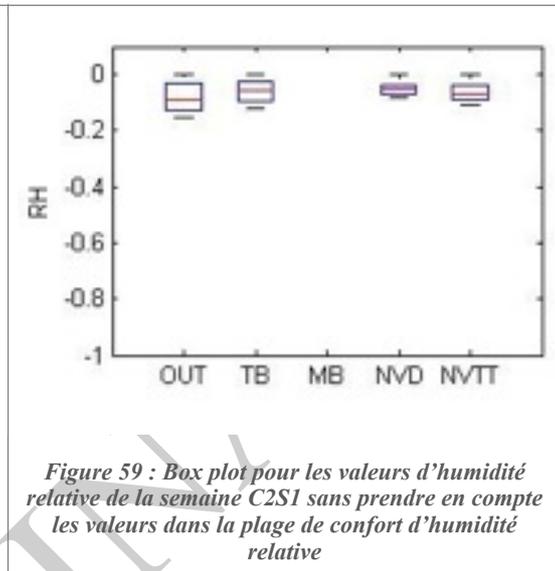
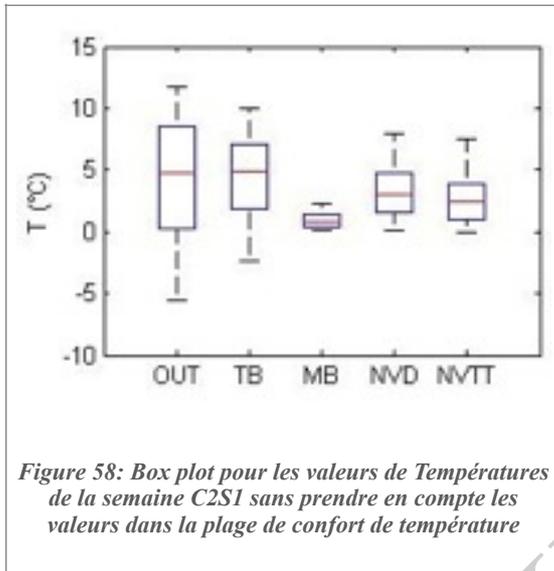
Nous allons donc réeffectuer l'analyse statistique sans prendre en compte les valeurs dans les plages de confort de températures et d'humidité relative. Autrement dit nous allons **enlever tous les Écarts de ZÉRO** avec la plage de confort de températures et d'humidité relative.

Voici les nombres de fois sur 672 mesures qu'il y a des valeurs dans les plages respectives de températures et d'humidité relative (Écart de ZÉRO).

sur 672	OUT_T	TB_T	MB_T	NVD_T	NVTT_T
C2S1	194	169	419	91	149

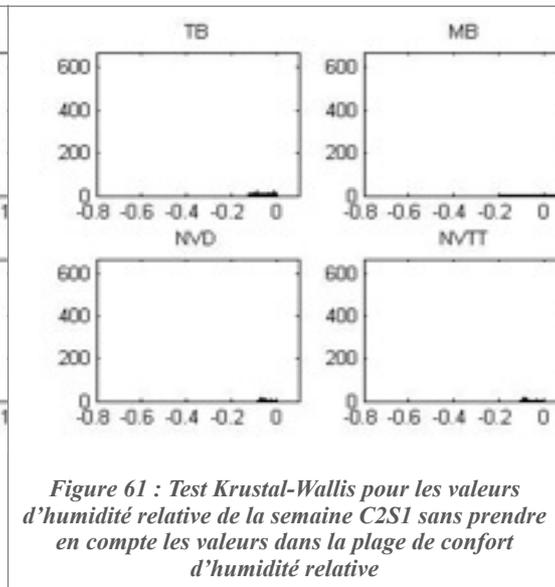
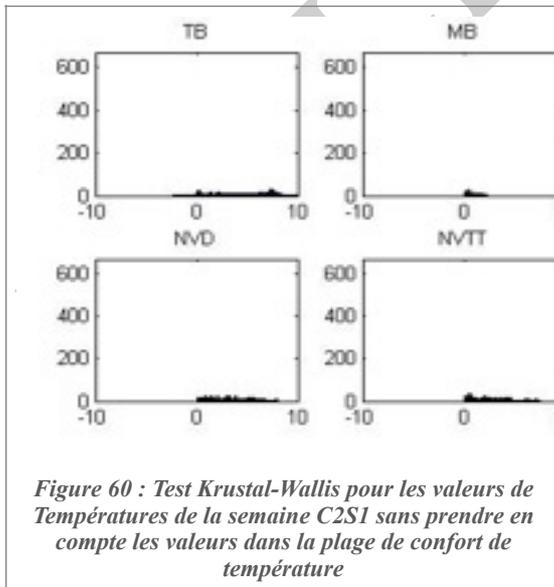
sur 672	OUT_RH	TB_RH	MB_RH	NVD_RH	NVTT_RH
C2S1	316	213	672	477	425

**Box plot**



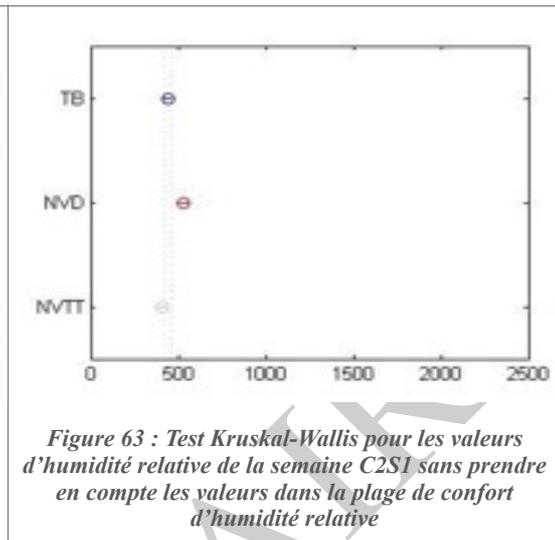
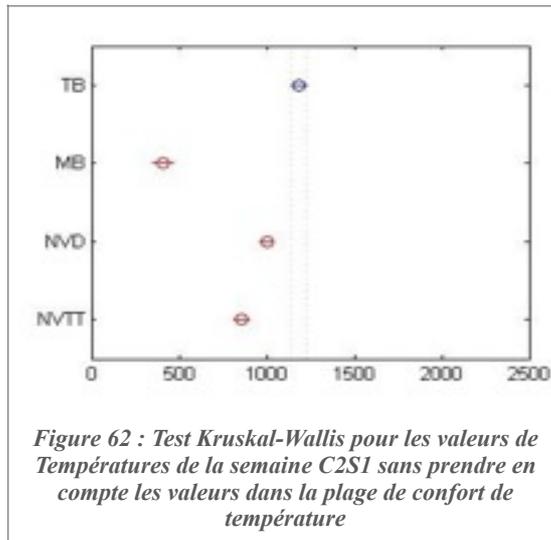
On remarque : Qu'il n'y a plus de données absurdes

**Histogramme**



On remarque : Qu'il n'y a bien plus de valeurs dans les plages de confort de température et d'humidité définies.

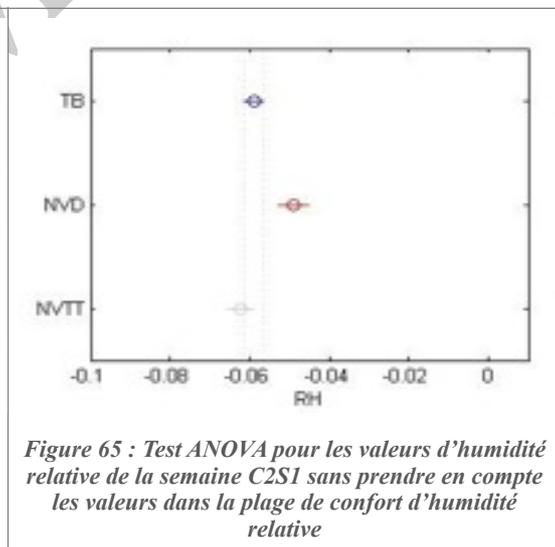
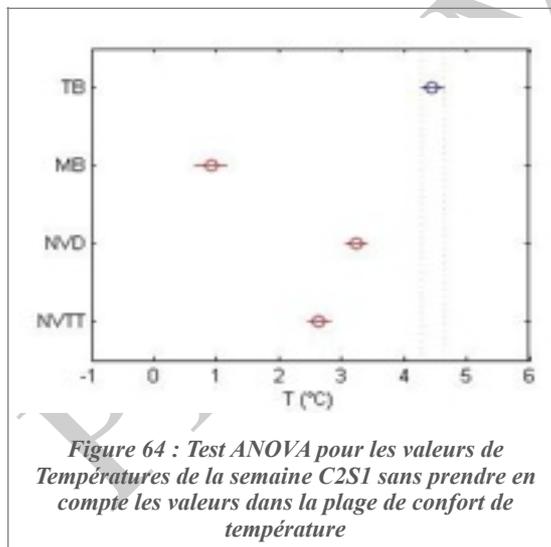
**Kruskal-Wallis**



Pour la température la graduation se lit du moins d'écart avec la plage de température de confort thermique à gauche au plus d'écart à droite.

Pour l'humidité relative, la graduation se lit du moins d'écart avec la plage d'humidité relative de confort thermique à droite au plus d'écart à gauche.

### ANOVA



### Wilcoxon Rank Sum Test

Tableau 26 ; pValue avec le Wilcoxon Rank Sum Test avec les données de températures sans prendre en compte les valeurs dans la plage de confort de température

C2S1	TB	MB	NVD	NVTT
TB		0	0	0

MB			0	0
NVD				0
NVT				

*Tableau 27 : pValue avec Wilcoxon Rank Sum Test avec les données d'humidité relative sans prendre en compte les valeurs dans la plage de confort d'humidité relative*

C2S1	TB	MB	NVD	NVTT
TB		0	0	0
MB			0	0
NVD				0
NVT				

**Two Sample T-Test**

*Tableau 28 : pValue avec Two Sample t-test avec les données de températures sans prendre en compte les valeurs dans la plage de confort de température*

C2S1	TB	MB	NVD	NVTT
TB		0	0	0
MB			0	0
NVD				0
NVTT				

C2S1	TB	MB	NVD	NVTT
TB		0	0	0
MB			0	0

NVD				0
NVTT				

Tableau 29 : pValue avec Two Sample t-test avec les données d'humidité relative sans prendre en compte les valeurs dans la plage de confort d'humidité relative

On remarque : que les données sont similaires avec notre Test Krustal Wallis!

Ainsi c'est encore les valeurs dans les plages de confort de températures et d'humidité relative qui perturbaient notre étude.

### **Observations**

**On définit qu'il y a, un écart significatif si pValue > 0,05**

**C'est-à-dire il y a un écart à 95 %**

On peut ainsi dire :

- Qu'il y a bien un écart significatif entre le bâtiment traditionnel et la voûte nubienne double pour l'humidité relative et la température.
- Qu'il y a bien un écart significatif entre le bâtiment moderne et la voûte nubienne triple épaisse pour l'humidité relative et la température.
- Qu'il y a bien un écart significatif entre la voûte nubienne double et la voûte nubienne triple épaisse pour l'humidité relative et la température.

6.4.2.2. *Étude des mesures à vide sur les silos de conservation de l'oignon. Semaine 1 à 10. (Comparaison des résultats)*

Avec les données d'humidité relative :

	Comparai son	Écart significatif de l'efficacité					
		<b>Campag ne à vide ZCT RH KRUSTA L</b>	NVTT/ NVD	NVTT>N VD	100,0 %	NVTT<N VD	
NVTT/MB	NVTT>M B		100,0 %	NVTT<M B		NVTT=M B	
NVTT/TB	NVTT>TB		100,0 %	NVTT<TB		NVTT=TB	
NVD/MB	NVD>MB			NVD<MB	100,0 %	NVD=MB	
NVD/TB	NVD>TB		100,0 %	NVD<TB		NVD=TB	
MB/TB	MB>TB		100,0 %	MB<TB		MB=TB	

	Comparai son	Écart significatif de l'efficacité					
		<b>Campag ne à vide ZCT RH ANOVA</b>	NVTT/ NVD	NVTT>N VD		NVTT<N VD	100,0 %
NVTT/MB	NVTT>M B			NVTT<M B	100,0 %	NVTT=M B	
NVTT/TB	NVTT>TB		100,0 %	NVTT<TB		NVTT=TB	
NVD/MB	NVD>MB			NVD<MB	100,0 %	NVD=MB	
NVD/TB	NVD>TB		100,0 %	NVD<TB		NVD=TB	
MB/TB	MB>TB		100,0 %	MB<TB		MB=TB	

Campagne à vide ZCT RH SANS OKRUSTAL	Comparaison	Écart significatif de l'efficacité					
	NVTT/NVD	NVTT>NVD		NVTT<NVD	100,0 %	NVTT=NVD	
	NVTT/MB	NVTT>MB	NaN	NVTT<MB	NaN	NVTT=MB	NaN
	NVTT/TB	NVTT>TB	25,0 %	NVTT<TB		NVTT=TB	75,0 %
	NVD/MB	NVD>MB	NaN	NVD<MB	NaN	NVD=MB	NaN
	NVD/TB	NVD>TB	100,0 %	NVD<TB		NVD=TB	
	MB/TB	MB>TB	NaN	MB<TB	NaN	MB=TB	NaN

Campagne à vide ZCT RH SANS ANOVA	Comparaison	Écart significatif de l'efficacité					
	NVTT/NVD	NVTT>NVD		NVTT<NVD	100,0 %	NVTT=NVD	
	NVTT/MB	NVTT>MB	NaN	NVTT<MB	NaN	NVTT=MB	NaN
	NVTT/TB	NVTT>TB	25,0 %	NVTT<TB		NVTT=TB	75,0 %
	NVD/MB	NVD>MB	NaN	NVD<MB	NaN	NVD=MB	NaN
	NVD/TB	NVD>TB	100,0 %	NVD<TB		NVD=TB	
	MB/TB	MB>TB	NaN	MB<TB	NaN	MB=TB	NaN

Avec les données de températures :

	Comparai son	Écart significatif de l'efficacité					
	<b>Campag ne à vide ZCT T KRUSTA L</b>	NVTT/ NVD	NVTT>N VD	100,0 %	NVTT<N VD		NVTT=N VD
NVTT/MB		NVTT>M B		NVTT<M B	100,0 %	NVTT=M B	
NVTT/TB		NVTT>TB	62,5 %	NVTT<TB		NVTT=TB	37,5 %
NVD/MB		NVD>MB		NVD<MB	100,0 %	NVD=MB	
NVD/TB		NVD>TB		NVD<TB	33,3 %	NVD=TB	66,7 %
MB/TB		MB>TB	100,0 %	MB<TB		MB=TB	

	Comparai son	Écart significatif de l'efficacité					
	<b>Campag ne à vide ZCT T ANOVA</b>	NVTT/ NVD	NVTT>N VD	100,0 %	NVTT<N VD		NVTT=N VD
NVTT/MB		NVTT>M B		NVTT<M B	100,0 %	NVTT=M B	
NVTT/TB		NVTT>TB	87,5 %	NVTT<TB	12,5 %	NVTT=TB	
NVD/MB		NVD>MB		NVD<MB	100,0 %	NVD=MB	
NVD/TB		NVD>TB	83,3 %	NVD<TB		NVD=TB	16,7 %
MB/TB		MB>TB	100,0 %	MB<TB		MB=TB	

	Comparai son	Écart significatif de l'efficacité					
--	-----------------	------------------------------------	--	--	--	--	--

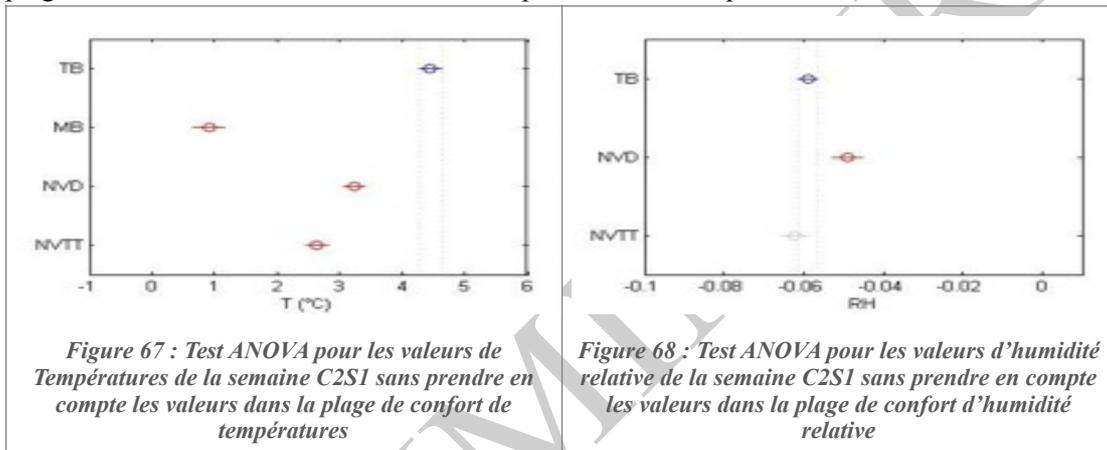
<b>Campagne à vide ZCT T SANS O KRUSTAL</b>	<b>NVTT/NVD</b>	NVTT>N VD	100,0 %	NVTT<N VD		NVTT=N VD	
	<b>NVTT/MB</b>	NVTT>M B		NVTT<M B	100,0 %	NVTT=M B	
	<b>NVTT/TB</b>	NVTT>TB	87,5 %	NVTT<TB		NVTT=TB	12,5 %
	<b>NVD/MB</b>	NVD>MB		NVD<MB	100,0 %	NVD=MB	
	<b>NVD/TB</b>	NVD>TB	50,0 %	NVD<TB		NVD=TB	50,0 %
	<b>MB/TB</b>	MB>TB	100,0 %	MB<TB		MB=TB	

<b>Campagne à vide ZCT T SANS O ANOVA</b>	<b>Comparaison</b>	<b>Écart significatif de l'efficacité</b>					
	<b>NVTT/NVD</b>	NVTT>N VD	100,0 %	NVTT<N VD		NVTT=N VD	
	<b>NVTT/MB</b>	NVTT>M B		NVTT<M B	100,0 %	NVTT=M B	
	<b>NVTT/TB</b>	NVTT>TB	75,0 %	NVTT<TB		NVTT=TB	25,0 %
	<b>NVD/MB</b>	NVD>MB		NVD<MB	100,0 %	NVD=MB	
	<b>NVD/TB</b>	NVD>TB	50,0 %	NVD<TB	16,7 %	NVD=TB	33,3 %
	<b>MB/TB</b>	MB>TB	100,0 %	MB<TB		MB=TB	

Le résultat NaN signifie que le test n'a pas pu être effectué. Cela est dû à la présence à 100 % de MB dans la plage de conservation de RH.

### 6.5. Analyse de la performance des bâtiments et groupes de bâtiments à vide vis-à-vis de la Zone de confort thermique pour les humains.

Pendant la campagne à vide lorsque l'on avance vers la saison humide le cycle de Température/Humidité relative s'éloigne de la Zone de confort thermique. Le bâtiment traditionnel et le moderne restent nettement plus longtemps dans la plage de températures de confort thermique. Cependant les variations de température sont nettement plus élevées dans le bâtiment traditionnel que dans les voûtes nubiennes. Le taux d'humidité vis-à-vis de la plage d'humidité relative de confort thermique bon dans chaque bâtiment.



On peut dire que statistiquement pour ce qui est de la performance de la construction :

Vis-à-vis de l'écart avec la plage de confort de Températures :

**MB > NVTT/NVD ; NVTT/NVD > TB ; NVTT > NVD**

Vis-à-vis de l'écart avec la plage de confort d'humidité relative :

**MB > NVTT/NVD ; NVD > TB ; NVD > NVTT**

Vis-à-vis de l'écart avec la zone de confort thermique :

**MB > NVTT/NVD > TB ; NVD et NVTT sont proches.**

## 7. ÉVALUATION DE L'INFLUENCE DE LA VENTILATION PASSIVE ET ACTIVE SUR LES CONDITIONS INTÉRIEURES.

Les résultats obtenus avec la campagne 1 pendant la saison sèche froide confirment les résultats obtenus avec la campagne 2 pendant la saison sèche chaude. Le bâtiment en voûte nubienne triple épaisse est REPRESENTATIF des bâtiments en voûte nubienne.

**Rappel sur les scénarios :**

C2S1	Mesure à vide des silos de conservation de l'oignon - Saison sèche chaude. Tous les ouvrants fermés/Jours et nuits
C2S2	Mesure à vide des silos de conservation de l'oignon - Saison sèche chaude. Tous les ouvrants ouverts/Jours et nuits
C2S3	Mesure à vide des silos de conservation de l'oignon - Saison sèche chaude. Tous les ouvrants fermés la journée/ouverts la nuit
C2S4a	Mesure à vide des silos de conservation de l'oignon - Saison sèche chaude. Tous les ouvrants ouverts fermés la journée/ouverts la nuit - avec ventilation mécanique pendant le jour
C2S4b	Mesure à vide des silos de conservation de l'oignon - Saison sèche chaude. Tous les ouvrants ouverts fermés la journée/ouverts la nuit - avec ventilation mécanique pendant la nuit

### 7.1. Évaluation du comportement des données hygrométriques

Ci-dessous sont représentées les températures et les humidités relatives minimales, moyennes et maximales ainsi que l'amplitude moyenne des températures et des humidités relatives sur la période d'instrumentation.

		C2S1	C2S2	C2S3		C2S4a	C2S4b
Température sur la période	Maximale	38,1	38,1	36,8		38,7	38,2
	Minimale	26,7	28,1	27,5		29,5	31,7
	Moyenne	31,9	33,0	32,7		34,3	34,8
	amplitude maximale journalière (T max - T min)	8,9	9,1	7,7		7,1	6,0
	amplitude moyenne journalière (T max - T min)	6,3	6,2	5,0		5,0	4,4
Humidité relative sur la période	Maximale	0,50	0,37	0,36		0,48	0,54
	Minimale	0,08	0,09	0,09		0,10	0,12
	Moyenne	0,24	0,20	0,20		0,24	0,33
	amplitude maximale journalière (RH max - RH min)	0,34	0,24	0,24		0,36	0,32
	amplitude moyenne journalière (RH max - RH min)	0,23	0,19	0,20		0,21	0,23
		+		-			

Ces analyses permettent de mettre en évidence :

- Que la meilleure inertie thermique pour les ventilations passives est fournie par le modèle C2S3 qui est tous les ouvrants fermés la journée/ouverts la nuit.

- Que la meilleure inertie thermique pour les ventilations actives est fournie par le modèle C2S4b qui est tous les ouvrants ouverts fermés la journée/ouverts la nuit - avec ventilation mécanique pendant la nuit.

## 7.2. Évaluation du comportement des données hygrométriques vis-à-vis de la Zone de conservation des oignons.

### KRUSKAL WALLIS

Avec les données de la voûte nubienne triple épaisse et extérieure

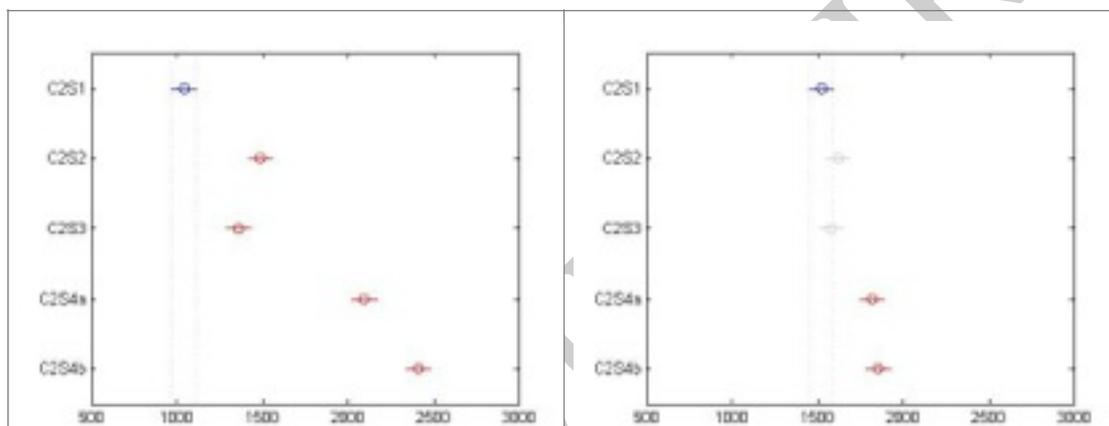


Figure 69 : Test Kruskal-Wallis pour les valeurs des Températures de la voûte nubienne triple épaisse (Campagne à vide, saison sèche chaude)

Figure 70 : Test Kruskal-Wallis pour les valeurs des Températures extérieures (Campagne à vide, saison sèche chaude)

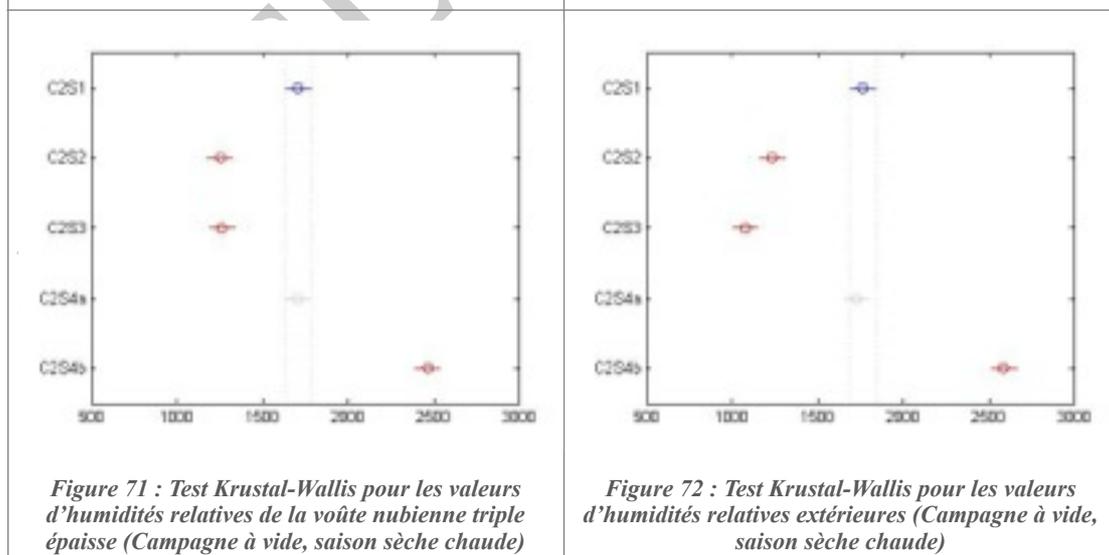


Figure 71 : Test Kruskal-Wallis pour les valeurs d'humidités relatives de la voûte nubienne triple épaisse (Campagne à vide, saison sèche chaude)

Figure 72 : Test Kruskal-Wallis pour les valeurs d'humidités relatives extérieures (Campagne à vide, saison sèche chaude)

### Wilcoxon Rank Sum Test

Avec les données de la voûte nubienne triple épaisse

*Tableau 30 : pValue avec le Wilcoxon Rank Sum Test avec les données de températures*

NVTT	C2S1	C2S2	C2S3	C2S4A	C2S4B
C2S1		0	0	0	0
C2S2			0.0410	0	0
C2S3				0	0
C2S4A					0
C2S4B					

*Tableau 31 : pValue avec le Wilcoxon Rank Sum Test avec les données de températures*

OUT	C2S1	C2S2	C2S3	C2S4A	C2S4B
C2S1		0.0367	0.2531	0	0
C2S2			0.4441	0	0
C2S3				0	0
C2S4A					0.5690
C2S4B					

Avec les données extérieures

*Tableau 32 : pValue avec le Wilcoxon Rank Sum Test avec les données d'humidités relatives*

NVTT	C2S1	C2S2	C2S3	C2S4A	C2S4B
C2S1		0	0	0.8083	0
C2S2			0.8617	0	0
C2S3				0	0
C2S4A					0
C2S4B					

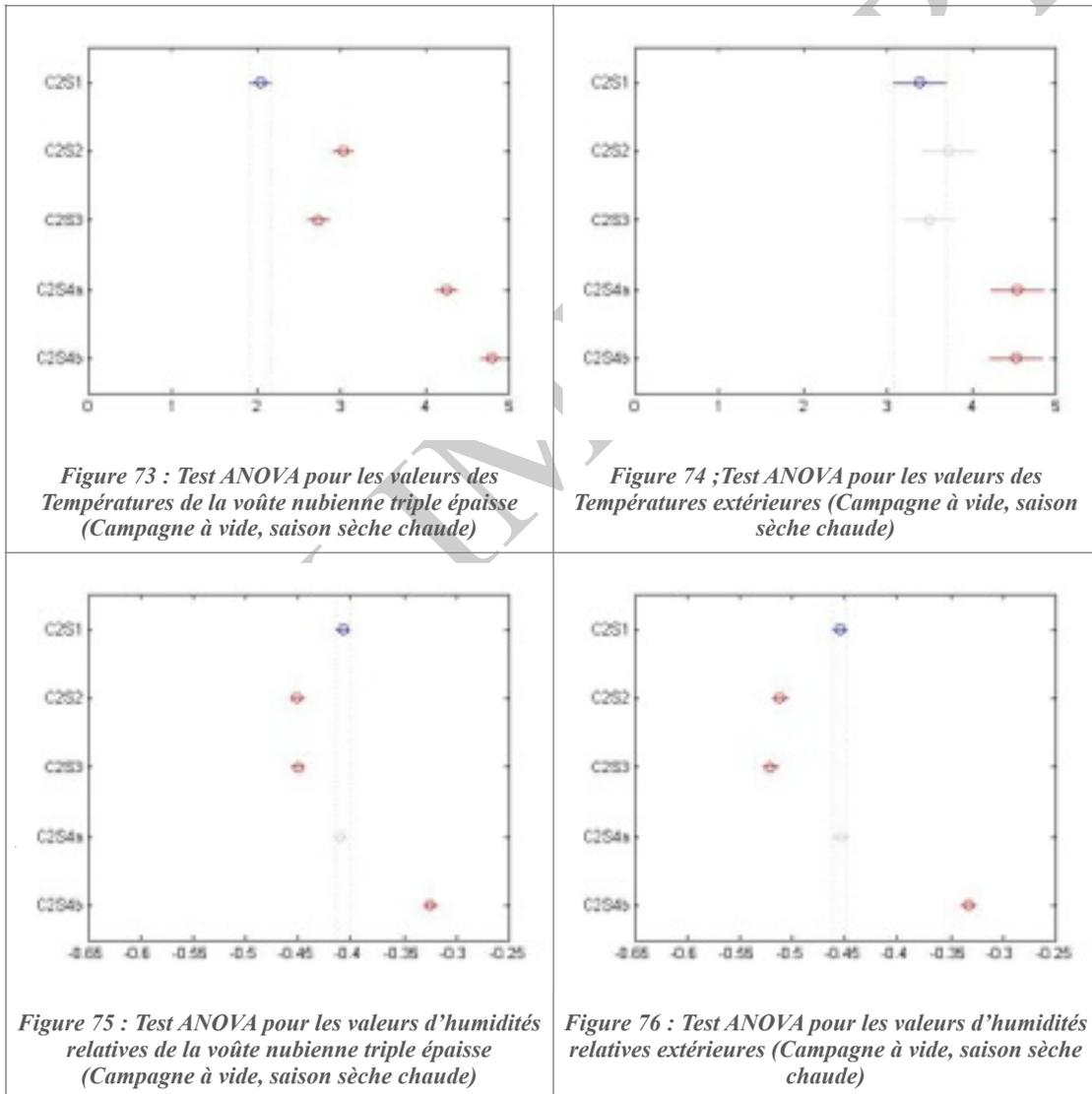
*Tableau 33 : pValue avec le Wilcoxon Rank Sum Test avec les données d'humidités relatives*

OUT	C2S1	C2S2	C2S3	C2S4A	C2S4B
C2S1		0	0	0.3270	0

C2S2			0	0	0
C2S3				0	0
C2S4A					0
C2S4B					

**ANOVA**

Avec les données de la voûte nubienne triple épaisse et extérieure



**Two Sample t-test**

Avec les données de la voûte nubienne triple épaisse

*Tableau 34 : pValue avec Two Sample t-test avec les données de températures*

NVTT	C2S1	C2S2	C2S3	C2S4A	C2S4B
C2S1		0	0	0	0
C2S2			0.0022	0	0
C2S3				0	0
C2S4A					0
C2S4B					

*Tableau 35 : pValue avec Two Sample t-test avec les données de températures*

OUT	C2S1	C2S2	C2S3	C2S4A	C2S4B
C2S1		0.1301	0.5854	0	0
C2S2			0.3205	0	0
C2S3				0	0
C2S4A					0.9857
C2S4B					

Avec les données extérieures

*Tableau 36 : pValue avec Two Sample t-test avec les données d'humidités relatives*

NVTT	C2S1	C2S2	C2S3	C2S4A	C2S4B
C2S1		0	0	0.5220	0
C2S2			0.8134	0	0
C2S3				0	0
C2S4A					0
C2S4B					

*Tableau 37 : pValue avec Two Sample t-test avec les données d'humidités relatives*

OUT	C2S1	C2S2	C2S3	C2S4A	C2S4B

C2S1		0	0	0.9101	0
C2S2			0	0	0
C2S3				0	0
C2S4A					0
C2S4B					

PRELIMINAIRE

Les résultats indiquent que les ventilations passive et active n'influent pas sur les conditions d'humidité relative dans la voûte nubienne. Il semblerait que les conditions d'humidité relative à l'intérieur de la voûte nubienne soient calquées sur les conditions d'humidité relative à l'extérieur.

Cependant les résultats indiquent que **la ventilation passive et active influe sur les conditions de température dans la voûte nubienne.**



Les mesures de la température extérieure ne possèdent pas d'écart significatif pendant les trois semaines de test avec ventilation passive (C2S1, C2S2, C2S3). Cela nous permet de comparer les conditions de température dans la voûte nubienne pour ces trois scénarios différents. On trouve ainsi que :  $C2S1 > C2S3 > C2S2$ .

Il serait donc préférable de laisser tous les ouvrants fermés/Jours et nuits.

De même les mesures de la température extérieure ne possèdent pas d'écart significatif pendant les deux semaines de test avec ventilation active (C2S4a, C2S4b). Cela nous permet de comparer les conditions de température dans la voûte nubienne pour ces deux scénarios différents. On trouve ainsi que :  $C2S4a > C2S4b$ .

Il serait donc plus préférable de laisser la ventilation mécanique pendant le jour plutôt que pendant la nuit.

L'écart entre les mesures de la température extérieure avec ventilation passive et celui avec ventilation active est très inférieur à l'écart entre les mesures de la température dans la voûte nubienne avec ventilation passive et celui avec ventilation active. On peut ainsi dire qu'il est préférable d'utiliser une ventilation passive plutôt que mécanique.

Attention : Ces résultats prennent uniquement en compte les données hygrométriques. Ces résultats nous indiquent qu'une ventilation plus ou moins forte augmente la température intérieure et par conséquent l'écart avec la Zone de conservation des oignons telle qu'on l'a définie. La définition de notre zone de conservation des oignons ne prend pas en compte l'importance de la ventilation pendant le stockage des oignons.

## **8. COMPARAISON DES MESURES DES BÂTIMENTS À VIDE ET EN CHARGE**

Dans le cadre de notre étude les mesures à vide et les mesures en charge se déroulent sur différentes périodes.

Ainsi les paramètres extérieurs diffèrent entre les mesures en charge et celles à vide.

Différentes études ont été réalisées, mais elles n'ont pas été fructueuses du fait de la forte influence des paramètres extérieurs sur les conditions intérieures de la voûte nubienne.

Il faudra par la suite réaliser une campagne de mesures à vide et une en charge en simultané pour pouvoir établir des conclusions crédibles sur la comparaison entre les mesures dans les bâtiments à vide et en charge.

L'influence de la présence des oignons sur les conditions hygrométriques à l'intérieure des bâtiments n'a donc pas pu être démontré. Ainsi l'étude pour le confort thermique des humains n'a pas pu être réalisée sur la période en charge.

## 9. CONSERVATION DES OIGNONS

Ici sont représentées les taux de pertes et de déshydratation des 5 filets de 8 oignons placés dans les différents bâtiments instrumentés après avoir été conservé pendant 3 mois de mai à juillet.

### 9.1. Évaluation du taux de pertes d'oignons

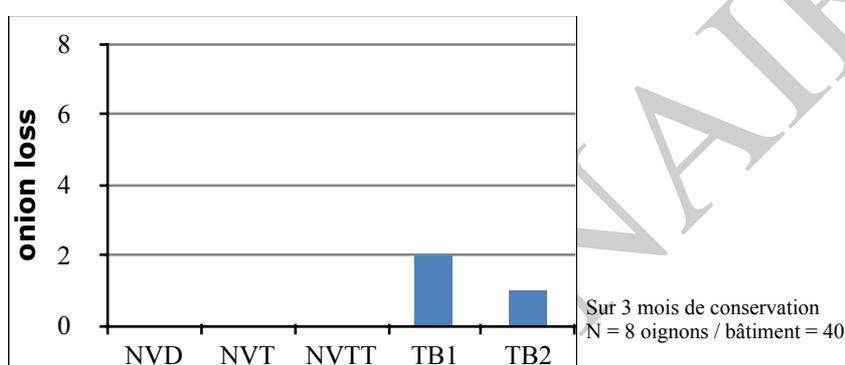


Figure 78 : Nombre d'oignon pourri dans un filet de 8 oignons après une conservation de 3 mois dans les différents bâtiments instrumentés

Le taux de pertes d'oignons par pourrissement est nul dans les échantillons d'oignons placés dans les différentes voûtes nubiennes alors que celui-ci est à une moyenne de 19% dans les bâtiments traditionnels instrumentés.

### 9.2. Évaluation du taux de déshydratation des oignons

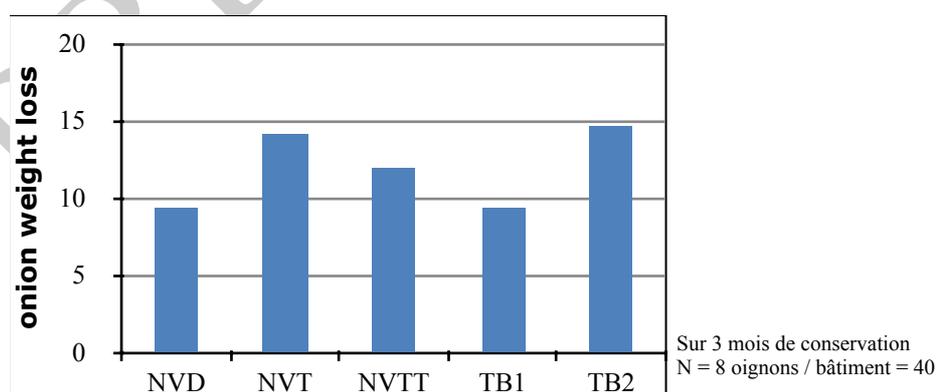


Figure 79 : Taux de perte de poids des oignons dans un filet de 8 oignons après une conservation de 3 mois dans les différents bâtiments instrumentés

Le taux de déshydratation des oignons est aux alentours de 11% dans tous les bâtiments instrumentés.

## 10. ANALYSE ÉCONOMIQUE PAR BÂTIMENT

### 10.1. Chiffrage des coûts dans chaque voûte nubienne

Les tableaux 38 et 39 présentent un chiffrage approximatif de la construction des bâtiments en voûte nubiennes réalisés par l'édition 2013 du GCIUS.

*Tableau 38: Chiffrage approximatif pour la construction des bâtiments en Voûtes nubiennes (Francs CFA)*

	TOTAL	VND	VNT	VNTT
Matériaux et gros œuvre	6 302 600	800 430	2 357 172	3 144 998
Chapes et crépissages	1 891 750	240 252	707 514	943 984
Ouvertures	900 850	126 120	387 365	387 365
Ventilation	566 000	0	283 000	283 000
Étagères	5 982 750	717 930	2 632 410	2 632 410
Main d'œuvre	4 398 750	558 641	1 645 132	2 194 977

Coût avec Main d'œuvre	20 042 700	2 443 373	8 012 593	9 586 734
Coût $\ominus$ Main d'œuvre	15 643 950	<b>1 884 732</b>	<b>6 367 461</b>	<b>7 391 757</b>

*Tableau 39 : Chiffrage approximatif pour la construction des bâtiments en Voûtes nubiennes (CAD)*

	TOTAL	VND	VNT	VNTT
Matériaux et gros œuvre	13 551	1 721	5 068	6 762
Chapes et crépissages	4 067	517	1 521	2 030
Ouvertures	1 937	271	833	833
Ventilation	1 217	0	608	608

Étagères	12 863	1 544	5 660	5 660
Main d'œuvre	9 457	1 201	3 537	4 719

Coût avec Main d'œuvre	43 092	5 253	17 227	20 611
Coût $\ominus$ Main d'œuvre	33 634	<b>4 052</b>	<b>13 690</b>	<b>15 892</b>

PRELIMINAIRE

## 10.2. Répartition des coûts dans chaque voûte nubienne

Les figures 80, 81 et 82 représentent par répartitions des coûts de chaque bâtiment en voûte nubiennes réalisés par l'édition 2013 du GCIUS.



Figure 80 : Répartition des coûts pour la VN double



Figure 81: Répartition des coûts pour la VN Triple

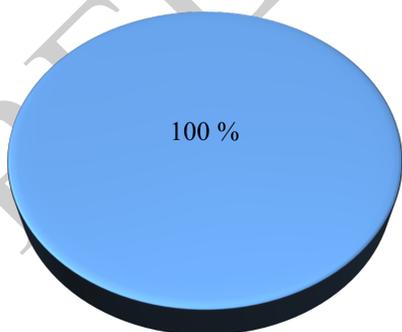


Figure 82 : Répartition des coûts pour la VN Triple Épaisse

## 10.3. Comparaison des coûts dans chaque bâtiment de conservation de l'oignon

Cette étude met en évidence le prix de construction de différents silos de conservation de l'oignon pour un même tonnage.

Silos de conservation	En Voûte Nubienne			En paille type RUDU	En banco avec toiture paille	En banco type RESEDA	Modernes en toiture en paille	Moderne en toiture en tôle
Illustration								
	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3					
Stockage	Individuel	Collectif	Collectif	Individuel	Individuel	Individuel ou collectif	Individuel ou collectif	Collectif
Période de stockage (mois)	3	4 à 5	4 à 5	3	2 à 3	4	5	5
Capacité de stockage (tonnes)	7	27	27	1,5	15	12	12	15
Prix (FCFA)	1 884 732	6 367 461	7 391 757	50 000	300 000	1 500 000	3 300 000	5 000 000
Preis (CAD)	4 052	13 890	15 892	108	645	3 225	7 095	10 750
Prix pour une tonne de stockage (FCFA)	269247	235832	273769	33333	20000	125000	275000	333333
Rapport du prix pour une tonne de stockage par rapport au modèle VN2	<b>1,2</b>	<b>1,0</b>	<b>1,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,6</b>	<b>1,2</b>	<b>1,5</b>

*Figure 83: Comparaison des coûts dans chaque bâtiment de conservation de l'oignon*

Notre étude économique est réalisée sur les prix de constructions. Il serait recommandable d'étudier le cout d'amortissement des chaque bâtiments en tenant compte des coûts d'entretiens et de réparations. En effet vis-à-vis des bâtiments de type RUDU ou BANCO, deux types de bâtiments traditionnels de base, le prix de construction d'un silo de conservation en voute nubienne est plus élevé pour la 1<sup>ère</sup> année. Cependant, des réparations fréquentes sont nécessaires presque chaque année pour les bâtiments traditionnels. En peu de temps, les bâtiments en voûte nubienne deviennent économiquement rentables.

## **11. QUESTIONS DE RECHERCHE ET SOMMAIRE DES RÉPONSES**

L'étude de l'instrumentation fournit une multitude de renseignements pratiques et chiffrés. Faisons ressortir l'essentiel.

### **Est-ce que les voûtes nubiennes permettent une meilleure conservation des oignons comparativement à une construction traditionnelle ou moderne?**

Contrairement aux attentes initiales, il a été constaté que les voûtes nubiennes ne représentent pas nécessairement une meilleure option d'entreposage pour la conservation comparativement aux bâtiments traditionnels. Dans toutes les situations le bâtiment moderne étudié est plus performant que les différentes voûtes nubiennes, c'est-à-dire qu'il offre un meilleur confort thermique pour les oignons et son inertie thermique est plus élevée. En observant l'écart avec la zone de conservation des oignons on remarque que lorsque les silos sont pleins d'oignons en saison humide chaude, les bâtiments traditionnels sont plus performants que les différentes voûtes nubiennes.

Malgré ce qui précède, l'analyse statistique montre que les différences entre les différents bâtiments en ce qui a trait à l'écart par rapport à la zone de confort thermique pour les oignons sont relativement petits, le plus élevé étant de 1,5°. Plus précisément en campagne en charge, au pire moment, soit quand les écarts sont les plus élevées, l'écart moyen de température entre les voûtes et la zone de confort est de l'ordre de 3,5° C, alors que l'écart entre le bâtiment moderne et la zone de confort est de 2,5° C. En même temps, l'écart dans le cas des bâtiments traditionnels est de 3° C. En ce qui a trait à l'humidité relative, ces écarts sont encore plus petits. Seul le bâtiment moderne étudié se démarque avec une humidité relative plus élevée (donc plus proche de la zone idéale de conservation), possiblement dû au fait de l'emplacement de sa fondation sous le niveau du sol (permettant plus de fraîcheur).

On pourrait analyser les performances aussi sous le prisme de l'inertie thermique des bâtiments. Les résultats chiffrés permettent de constater que la voûte nubienne triple épaisse conduit à une diminution jusqu'à 5 °C de l'amplitude maximale journalière par rapport à celle au bâtiment traditionnel, dont l'amplitude - calquée sur la température extérieure - est beaucoup plus grande. Les seuils de maxima de température des voûtes nubiennes sont inférieurs à celui du bâtiment traditionnel et les seuils minima de température sont supérieurs. Les valeurs de températures dans les bâtiments en voûtes nubiennes sont donc beaucoup plus constantes que celles dans les constructions traditionnelles, mais il fait plus chaud en moyenne dans les voûtes. Le fait de ne pas subir de grandes variations pourrait résulter en une meilleure conservation des oignons (si l'hypothèse posée précédemment s'avère, soit qu'une inertie thermique plus élevée favorise aussi la conservation des oignons). Une fois encore, ce qui précède n'a été que partiellement vérifié.

**Est-ce qu'il y a des différences importantes entre les divers types de voûtes nubiennes?**

Du seul point de vue de l'étude statistique sur les écarts avec la zone de confort pour les oignons (bâtiments en charge), on pourrait arriver à la conclusion qu'un type de voûte serait préférable à une autre (à cause de la ventilation, de l'épaisseur du mur, etc.). Néanmoins, tel qu'indiqué à la Figure 2, les écarts de température sont, en valeurs absolues, minimales (écarts moyen de l'ordre de 0,5° C). Le même constat s'applique aux valeurs d'humidité relative (écarts inférieurs à 2 % ; Figure 2).

Il en ressort ainsi que, du point de vue pratique, aucun type de voûte ne se démarque par rapport à une autre. Cette analyse se limite à la comparaison des voûtes entre elles.

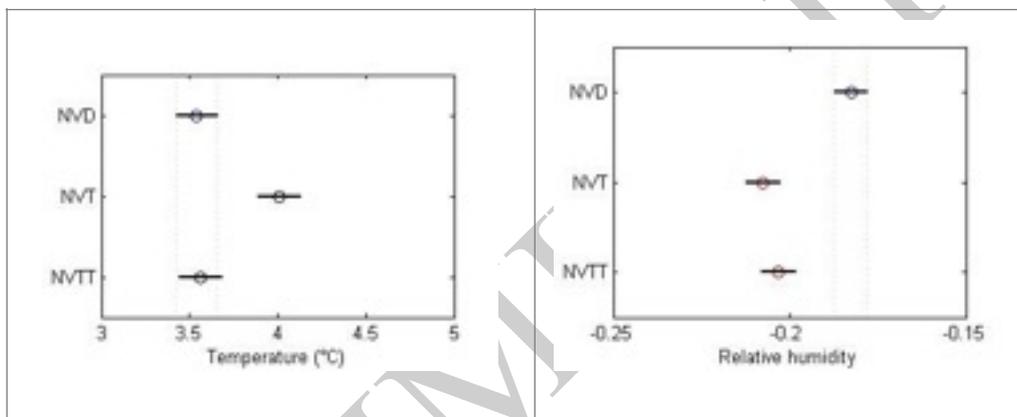


Figure 2 Test ANOVA sur les écarts de température et d'humidité entre les valeurs obtenues à l'intérieur des bâtiments et les celles qui définissent les zones de confort thermique pour la conservation des oignons – Campagne en charge, saison humide chaude

**Est-ce que les oignons qui sont conservés dans une construction en voûte nubienne sont de meilleure qualité que ceux conservés dans une construction conventionnelle?**

À propos des échantillons d'oignons qui ont été placés dans les 5 bâtiments instrumentés de mai à juillet on observe que :

- Le taux de pertes d'oignons par pourrissement est nul pour ceux placés dans les voûtes nubiennes, alors que ce taux est en moyenne de 19% dans les bâtiments traditionnels instrumentés.
- Le taux de déshydratation (associé à la perte de poids) des oignons se situe aux alentours de 11% dans tous les bâtiments instrumentés.

**La Voûte nubienne présente-t-elle un meilleur confort thermique qu'une construction conventionnelle traditionnelle, en ce qui concerne l'habitat pour les humains ?**

Tel que mentionné précédemment, l'inertie thermique des bâtiments en voûtes nubiennes est supérieure à celle des bâtiments traditionnels et est proche de l'inertie thermique procurée par

le bâtiment moderne. Basé sur les écarts avec la zone de confort thermique pour les humains, l'analyse du critère de confort thermique montre que les voûtes nubiennes offrent un meilleur confort thermique que les bâtiments traditionnels étudiés. Le bâtiment moderne offre un confort thermique égal, sinon supérieur, aux voûtes nubiennes. Ces conclusions sont basées sur l'analyse de données en période sèche seulement. La base de données en période chaude et humide n'est valable que pour des bâtiments remplis d'oignons.

**Est-ce que l'utilisation des voûtes nubiennes serait économiquement rentable par rapport aux autres silos de conservation d'oignons analysés?**

Parmi les trois modèles de voûtes nubiennes, la voûte nubienne triple est la plus économiquement rentable. Le prix de construction d'un espace de stockage par tonne d'oignons stockés est 20 % plus bas que celui des autres voûtes. Quoiqu'il y ait une amélioration de température statistiquement significative en tout temps si on construit avec des voûtes nubiennes triples avec des murs plus épais, plutôt que des voûtes à épaisseur standard, ces différences sont à toutes fins pratiques, minimales. Il en ressort qu'il n'y a pas d'avantage à construire avec des murs plus épais, car le coût de construction augmente.

Si les bâtiments moderne et traditionnel peuvent surpasser ou rivaliser avec la technique des voûtes nubiennes vis-à-vis des conditions de conservation de l'oignon, il en va autrement pour ce qui est du coût de construction. Le coût de construction d'un bâtiment moderne ou traditionnel se situe entre 20 à 50 % de plus pour un même tonnage stocké. De plus presque le tiers du coût des voûtes peut être attribué aux étagères de très haute qualité qui y ont été installées. Il en résulte que, si on compare seulement le coût des bâtiments, l'écart en faveur des voûtes devient encore plus significatif.

Les analyses qui précèdent tiennent compte seulement des coûts de construction pour les bâtiments moderne et traditionnel analysés. On ne peut pas extrapoler les conclusions à tous les types de silos de conservation d'oignons. De plus, on ne tient pas compte des structures de financement, de la facilité pour les agriculteurs à s'organiser en coopérative, etc. Ainsi, pour un agriculteur seul, la construction d'une voûte double peut constituer une bonne option.

Ce qui précède étant dit, les coûts de construction associés à des bâtiments de type RUDO ou BANCO, deux types de bâtiments traditionnels plus rudimentaires que ceux instrumentés, sont environ 10 fois plus faibles que le prix de construction d'un silo de conservation en voûte nubienne. Cependant, des réparations fréquentes sont nécessaires presque à chaque année pour les bâtiments RUDO et BANCO. De plus, selon les sources consultées, les pertes d'oignon y sont très importantes (minimum de 30%). Il est donc possible d'argumenter – du point de vue purement économique – qu'en peu de temps, les bâtiments en voûtes nubiennes pourraient devenir plus attrayants que les types de silos de stockage les plus rudimentaires.

Les observations ci-dessus ne tiennent pas compte des difficultés de financement des agriculteurs de la région sous-sahélienne.

## **12. LIMITATIONS DE L'ÉTUDE**

Malgré le fait que cette étude ait été réalisée avec une base de données de température et d'humidité relative considérable, elle comporte des limitations importantes, notamment les suivantes:

- Représentativité des bâtiments testés :
  - Même si les bâtiments étudiés représentent bien une réalité tangible, il n'en demeure que le nombre de bâtiments était plutôt limité. Deux types de bâtiments très courants, à savoir BANCO et RUDO, n'ont pas été évalués.
  - Le bâtiment moderne est enterré et cela lui permet de maintenir une humidité relative interne plus élevée, ce qui favorise la fraîcheur et donc introduit un biais dans l'analyse. Il ne peut être assuré que les bâtiments modernes soient tous construits de cette façon. Si le biais positif n'y était pas, le bâtiment moderne ne serait peut-être pas aussi performant comparativement aux autres bâtiments.
- Représentativité des campagnes et des lieux d'instrumentation:
  - Les campagnes se sont déroulées sur une seule année, ce qui ne permet pas d'assurer la répétabilité dans le temps des résultats.
  - Les mesures ont été réalisées sur trois sites distincts ayant des petits écarts de température entre eux.
- Période d'observation :
  - Les mesures réalisées pour étudier l'influence de certains paramètres de conservation des oignons ont été faites à vide (sans oignon) et non en charge. Cela empêche, par exemple, d'évaluer de façon adéquate l'influence de la ventilation sur la conservation.
  - Les mesures réalisées pour étudier le confort thermique pour les humains (voûtes vides) ont été faites en saison sèche seulement.
- Étude des pertes :
  - L'étude des pertes a été réalisée sur des échantillons de 8 oignons placés dans chacun des 5 bâtiments, pour un total de 40 oignons ; donc un échantillon limité.
- Étude économique :
  - L'étude économique est basée surtout sur les prix de construction, alors qu'une analyse approfondie devrait inclure aussi le coût d'amortissement, d'entretien et de réparation de chaque bâtiment, ainsi que des conditions socio-économiques et financières particulières (disponibilité de crédit, capacité de gestion économique, etc.).
  - Certaines particularités peuvent causer des biais, comme la fondation excavée du bâtiment moderne (meilleure humidité et plus de fraîcheur, mais coût de construction plus élevé) et les étagères dans les voûtes (1/3 du prix global de chaque bâtiment de type voûte nubienne; mais une conservation améliorée).

### **13. RECOMMANDATIONS**

Afin de mieux cerner les gains potentiels d'utiliser un type de bâtiment plutôt qu'un autre, il serait judicieux d'étudier le comportement d'une même récolte stockée dans les différents bâtiments. Cela permettrait d'étudier l'impact des conditions hygrométriques sur le taux de déshydratation et de perte des oignons. Idéalement, une étude de plusieurs récoltes consécutives donnerait des résultats encore plus probants.

Pendant la saison sèche, le taux d'humidité dans les voûtes nubiennes est très faible. Il serait judicieux d'étudier des techniques artisanales – peu coûteuses - d'élévation du taux d'humidité, comme l'ajout de seaux d'eau dans la pièce.

Enfin, il serait opportun aussi de recueillir l'avis des agriculteurs sur l'utilisation potentielle des voûtes nubiennes. Des considérations sur le crédit (difficile à obtenir) doivent être incluses dans une telle étude.

### **14. CONCLUSION**

Les voûtes nubiennes offrent des conditions de conservation au moins semblables à celles des bâtiments traditionnels. De plus, l'analyse économique préliminaire effectuée montre que le coût de construction par tonne d'oignon stocké est moins élevé pour les voûtes nubiennes, comparativement aux bâtiments traditionnel ou moderne. Il faut considérer aussi les avantages écologiques potentiels de la construction de la voûte nubienne, dont le principal matériau de construction est la terre. Malgré les limitations de la présente étude, il est possible de conclure que la technique de la voûte nubienne est une option de bâtiment qui doit être considérée sérieusement pour la conservation des oignons en Afrique de l'Ouest.

## **15. BIBLIOGRAPHIE**

[1] Bruno JARNO, « Projet pilote de construction et diffusion de silos de conservation de l'oignon avec la technique des voûtes nubienne », Document Projet, TONO CONSEILS (2013), 29 pages

[2] Félix Antoine LANGLOIS, « Document descriptif de l'instrumentation des silos de conservation en voûtes nubiennes et traditionnelles », GCIUS (2013), 21 pages

[3] M MESSIAEN & A ROUAMBA, « Allium Ceba », Ressource végétale de l'Afrique tropicale 2, PROTA Légumes (2004), 736 pages

[4] Wyss URS, « Indicateurs de confort dans la technique de la voûte nubienne », EPFL (2007), 34 pages

### **Autres lectures :**

Madiana HAZOUME, « confort thermique des bâtiments en voûte nubienne », ICAM Nantes (2013), 38 pages

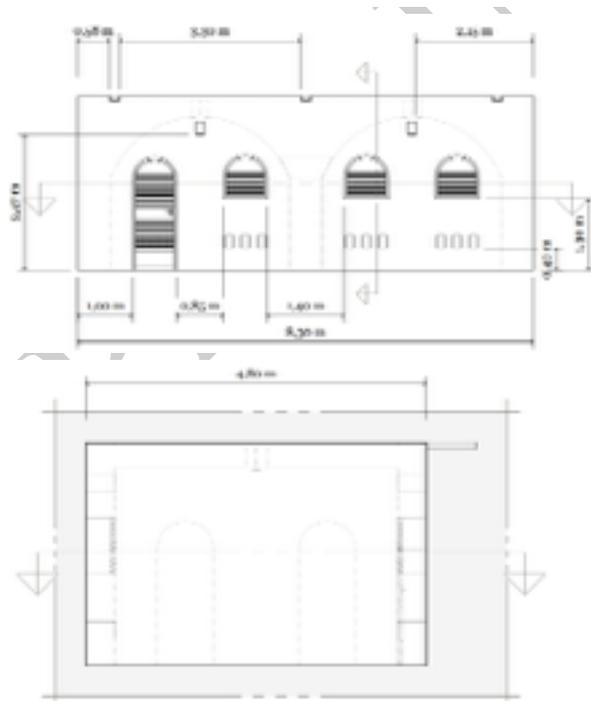
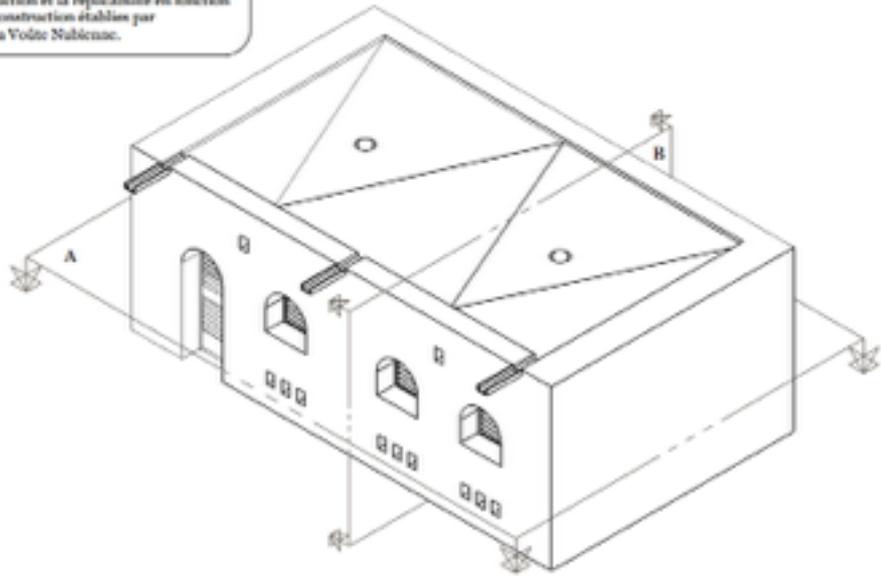
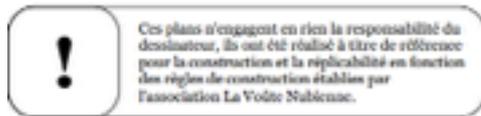
La Voûte Nubienne, « Un habitat bas carbone », Plaquette C02 (2015), 7 pages

Bruno JARNO, « Étude portant sur la technologie Voûte nubienne comme modèle de construction », rapport final GEF, TONO CONSEILS (2015), 182 pages

Bruno JARNO, « Projet pilote de construction et diffusion de silos de conservation de l'oignon avec la technique des voûtes nubienne », Conception des silos de conservation en voûtes nubiennes, TONO CONSEILS (2013), 57 pages

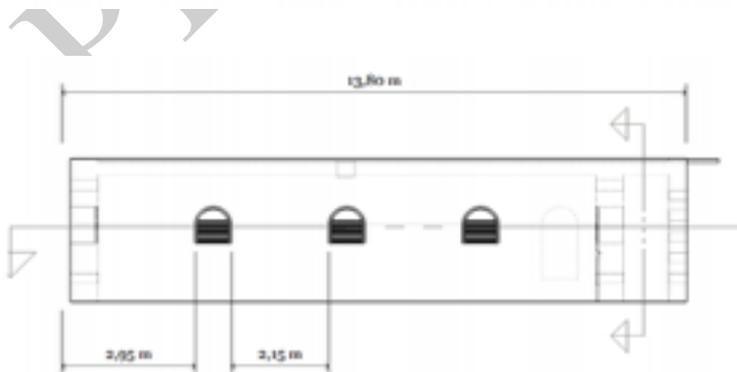
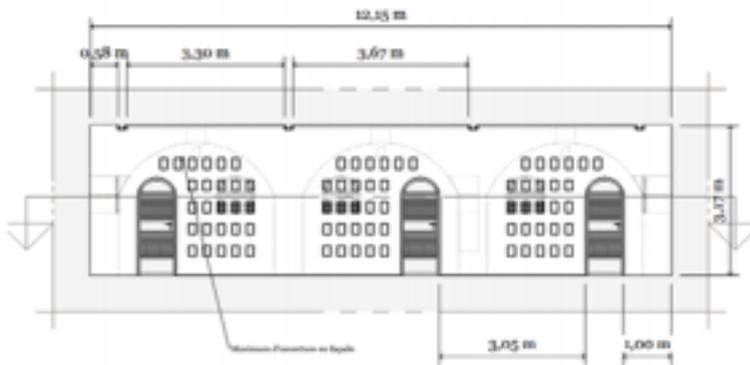
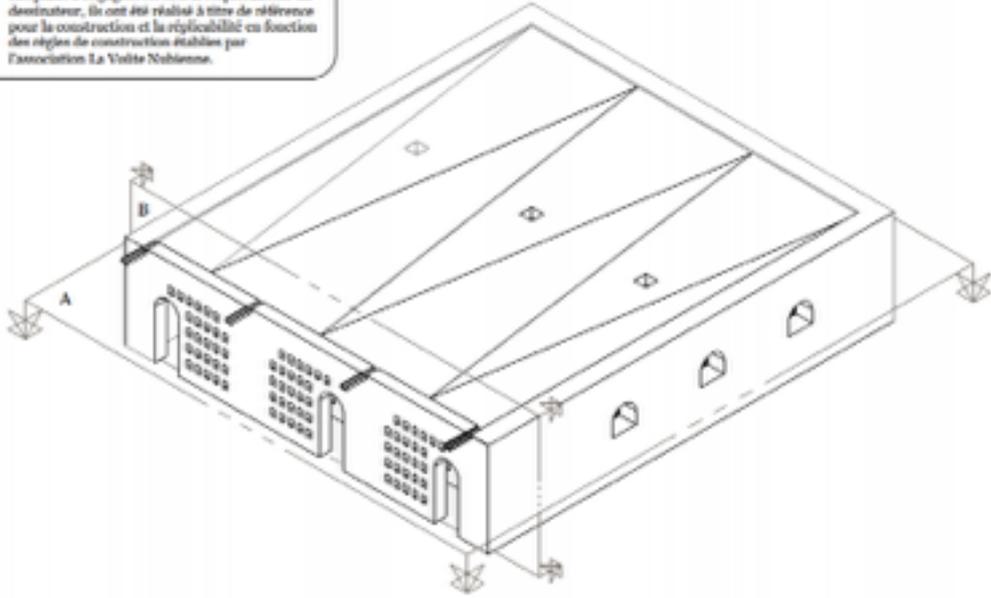
Félix Antoine LANGLOIS, « Rapport de l'instrumentation des silos de conservation en voûtes nubiennes et traditionnelles », GCIUS (2013), 21 pages

## ANNEXE A : PLAN VOÛTE NUBIENNE 1



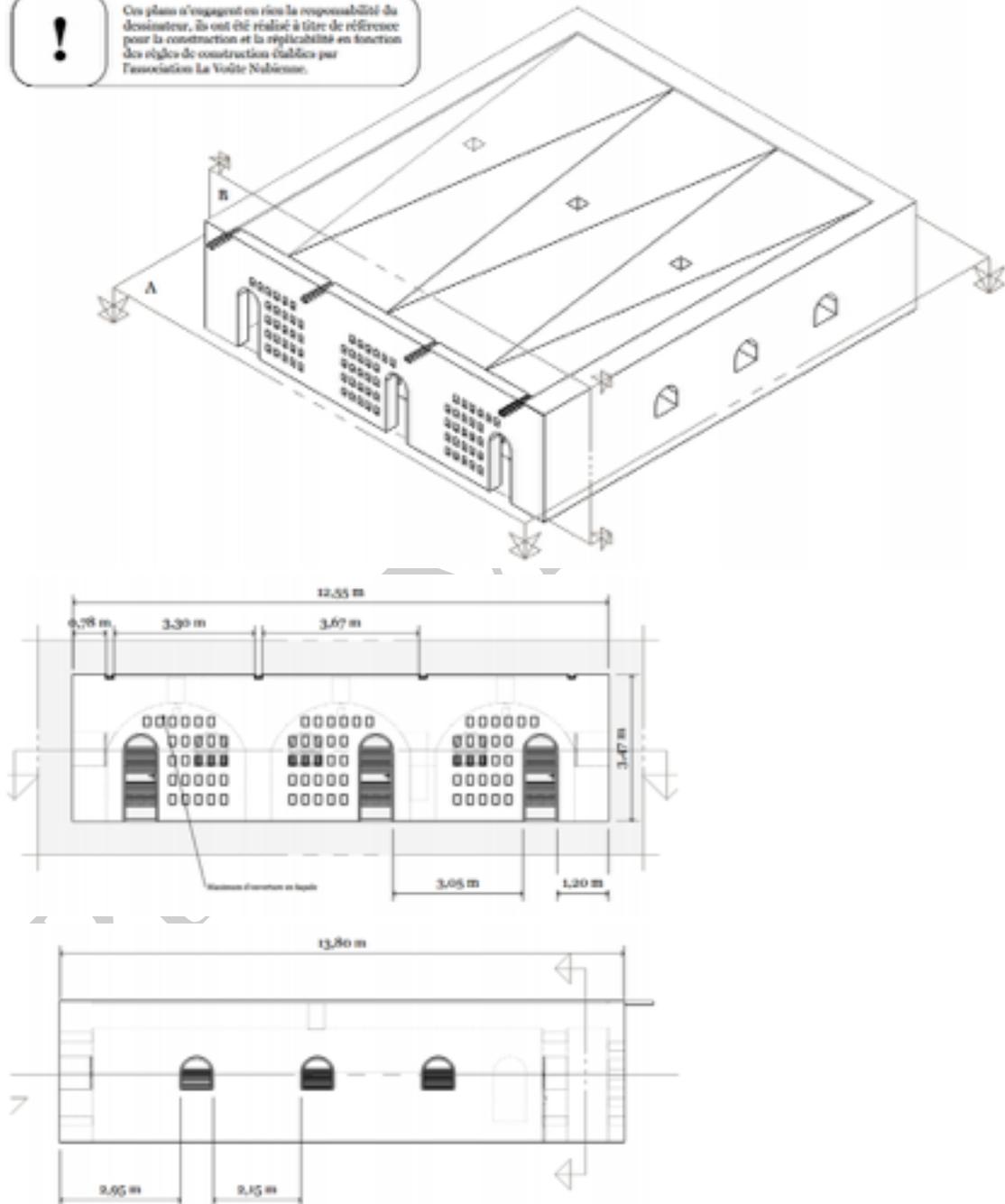
## ANNEXE B : PLAN VOÛTE NUBIENNE 2

! Ce plan s'engage en rien la responsabilité du destinataire, il est réalisé à titre de référence pour la construction et la répliquabilité en fonction des règles de construction établies par l'association La Voûte Nubienne.



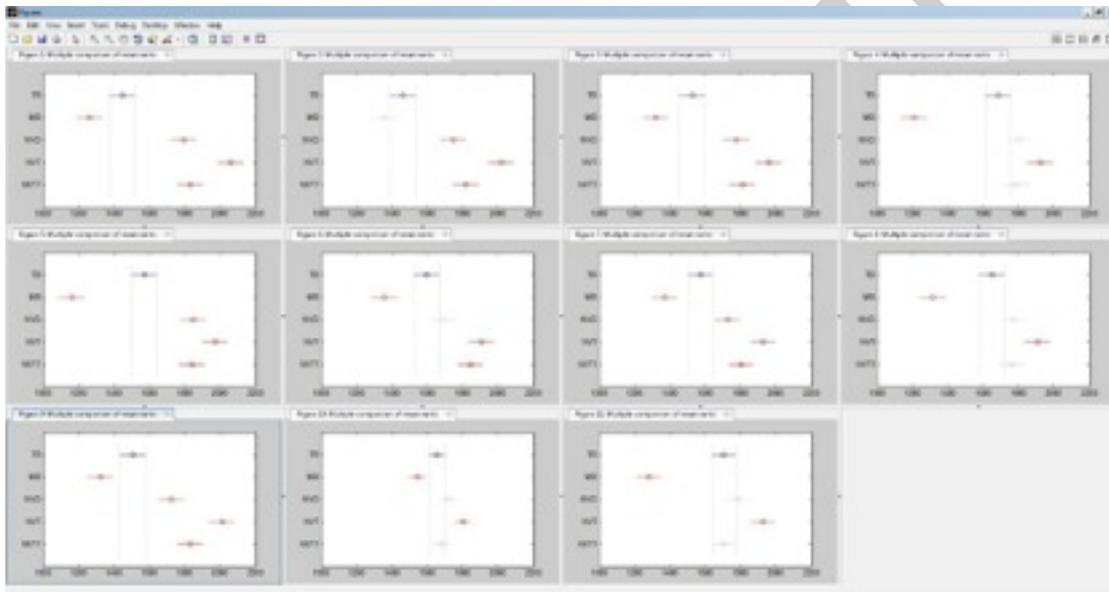
### ANNEXE C : PLAN VOÛTE NUBIENNE 3

! Ces plans n'engagent en rien la responsabilité du dessinateur. Ils ont été réalisés à titre de référence pour la construction et la répliquabilité en fonction des règles de construction établies par l'association La Voûte Nubienne.



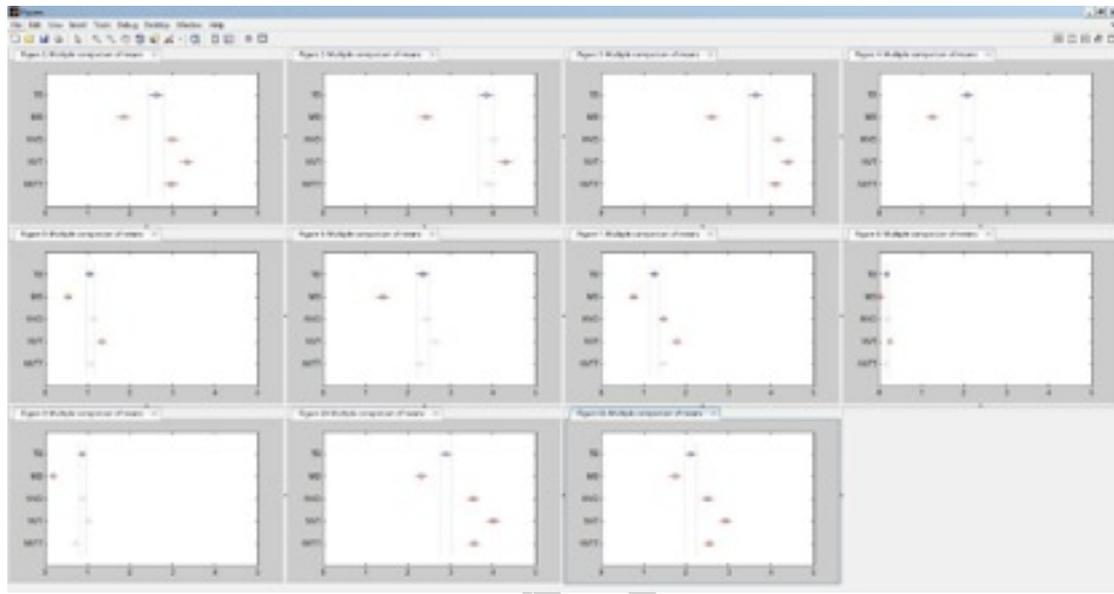
**ANNEXE D : RÉSULTATS BRUTES DES TESTS DES MESURES DES  
BÂTIMENTS EN CHARGE AU NIVEAU DES CONDITIONS DE  
CONSERVATION HYGROMÉTRIQUE POUR LES OIGNONS**

**Kruskal-Wallis et Wilcoxon Rank Sum Test pour T**



		TB/MB	TB/NVD	TB/NVT	TB/NVTT	MB/NVD	MB/NVT	MB/NVTT	NVD/NVT	NVD/NVTT	NVT/NVTT
pValue with Wilcoxon Rank Sum Test on T	C351	2.7737	4.8278e-11	1.7913e-21	3.5371e-12	5.1291e-26	1.2432e-56	3.3462e-32	6.7182e-08	0.4294	1.6889e-07
	C352	0.8633	5.7674e-07	2.2783e-20	3.5420e-11	7.4956e-14	3.4903e-39	2.5891e-22	6.0556e-07	0.2200	5.7735e-06
	C353	2.0065	2.9954e-06	2.7992e-13	2.1101e-04	6.0015e-18	1.3516e-35	1.7881e-23	2.8140e-04	0.6563	7.7308e-04
	C354	1.0796e-13	0.0712	3.8196e-04	0.1940	4.1577e-29	9.3664e-45	5.2676e-32	0.0300	0.5934	0.0020
	C355	4.4831e-08	6.0716e-06	3.8415e-10	3.0063e-06	1.5638e-39	2.1011e-57	3.0891e-45	0.0214	0.6430	0.0018
	C356	1.5878e-04	0.0734	7.8230e-08	7.3251e-06	4.6896e-10	2.0783e-28	9.7769e-23	2.2135e-04	0.0068	0.1728
	C357	2.9282e-04	0.0030	2.2977e-10	6.6826e-06	2.5470e-12	1.9300e-29	2.2881e-20	2.5396e-04	0.1792	0.0031
	C358	2.4181e-07	0.0359	4.7115e-05	0.0510	2.6004e-17	2.2009e-32	2.8768e-20	0.0231	0.2059	7.5389e-04
	C359	0.0099	2.3342e-05	1.9661e-19	6.6762e-10	8.9886e-14	1.4251e-42	3.3811e-26	3.6383e-07	0.0732	1.0746e-04
	C3510	1.4075e-04	0.0800	7.2253e-05	0.5000	1.3407e-08	1.2883e-15	3.6840e-06	0.0314	0.2225	6.6871e-04
	C3511	1.7885e-18	0.1569	4.1151e-05	0.8860	5.7351e-27	3.4291e-45	4.4891e-22	0.0067	0.0832	3.6044e-06

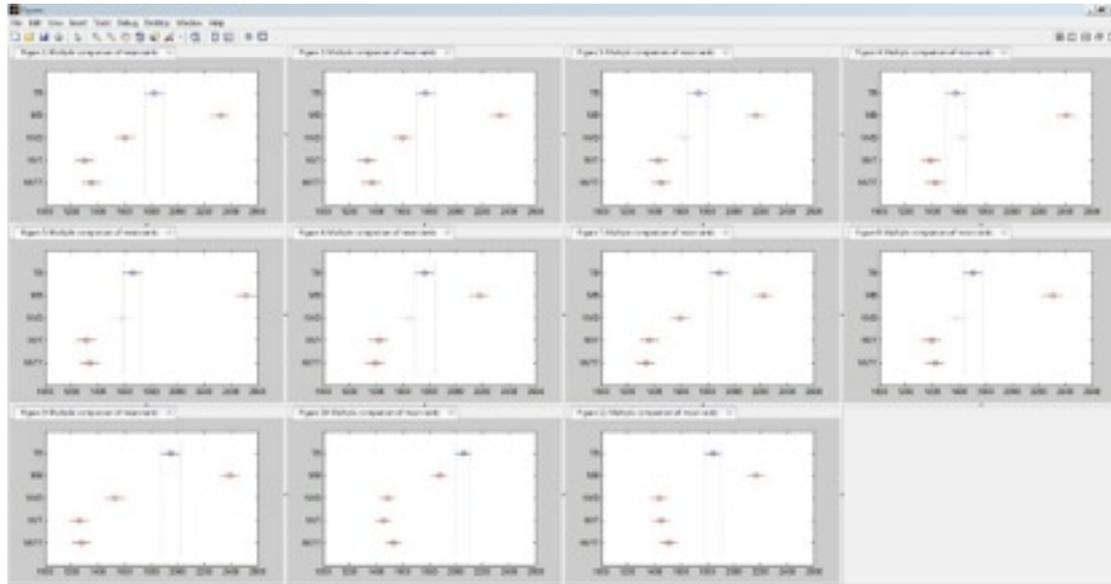
**ANOVA et T-test pour T**



		TB/MB	TB/NVD	TB/NVT	TB/NVTT	MB/NVD	MB/NVT	MB/NVTT	NVD/NVT	NVD/NVTT	NVT/NVTT
pValue with Two Sample t-test on T	C151	1.1822e-06	7.5711e-07	5.8531e-19	9.8711e-08	2.9157e-34	2.8953e-71	7.43197e-61	5.0171e-06	0.8471	2.9911e-06
	C152	2.5498e-04	5.1558e-04	1.4405e-13	4.7247e-05	6.3713e-17	1.7387e-40	1.5309e-21	1.9890e-05	0.6323	5.1722e-05
	C153	1.9627e-09	0.0079	2.3451e-07	0.0100	9.0471e-22	2.5626e-18	0.5850e-24	0.0064	0.8148	0.0022
	C154	4.6846e-24	0.2642	0.0025	0.6098	1.0760e-17	8.6567e-55	5.1009e-40	0.0159	0.4503	0.0023
	C155	5.8036e-16	1.2716e-04	2.7298e-09	2.9626e-04	2.2118e-47	1.0757e-67	2.7652e-53	0.0274	0.5907	0.0038
	C156	2.2644e-14	0.7944	0.0314	0.3125	3.0110e-17	1.8542e-31	4.0698e-25	0.0445	0.4325	0.1785
	C157	4.2783e-13	0.2964	1.8005e-04	0.2781	1.8154e-19	5.5592e-35	2.7891e-20	0.3736	0.3736	1.7552e-04
	C158	1.0252e-18	0.4480	0.0186	0.8999	5.7190e-25	1.4967e-38	1.1382e-22	0.0959	0.1099	4.2580e-04
	C159	1.8557e-10	0.0168	1.5343e-09	0.0120	2.2930e-21	2.4336e-45	1.2658e-26	2.4415e-04	0.9189	1.8668e-05
	C1510	6.8562e-11	0.3625	0.0101	0.4110	2.2031e-13	6.1759e-20	1.1500e-10	0.1014	0.0766	4.3457e-04
	C1511	2.1220e-16	0.8299	0.0295	0.0271	4.6844e-42	2.5556e-56	1.9090e-33	0.0830	0.0051	2.9443e-06

PRE

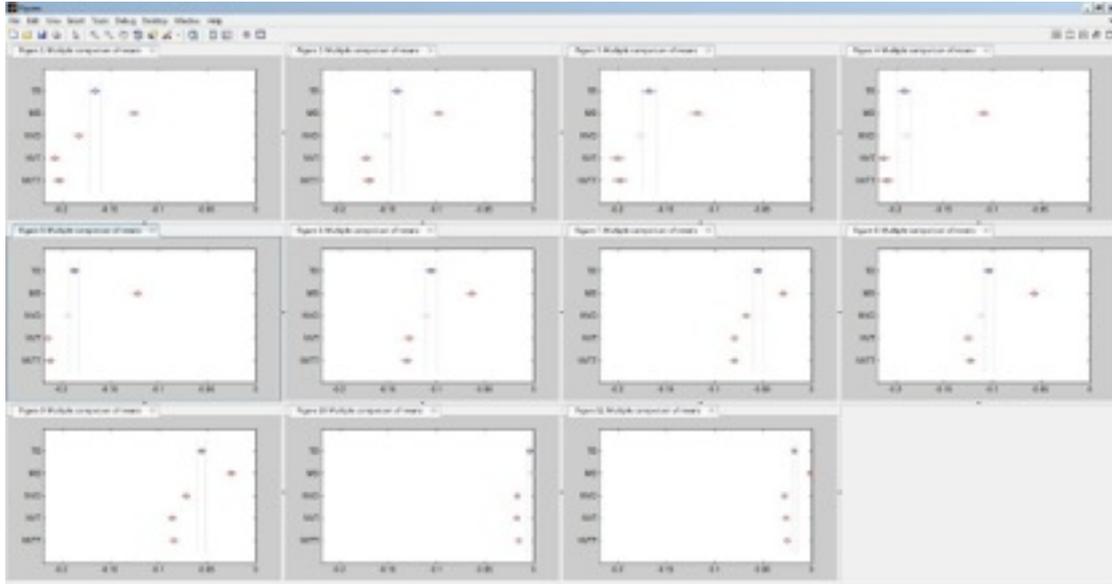
**Kruskal-Wallis et Wilcoxon Rank Sum Test pour RH**



		TB/MB	TB/NVD	TB/NVT	TB/NVTT	MB/NVD	MB/NVT	MB/NVTT	NVD/NVT	NVD/NVTT	NVT/NVTT
pValue with Wilcoxon Rank Sum Test on RH	C151	1.4172e-14	5.5512e-05	5.5247e-15	1.8652e-16	6.0923e-46	2.0203e-07	4.6688e-00	1.2422e-09	1.7000e-07	0.2524
	C152	7.5790e-20	0.0017	4.0374e-14	2.4371e-12	7.5213e-48	7.2279e-81	2.4835e-79	5.2840e-08	4.1670e-06	0.3556
	C153	1.8516e-12	0.0795	4.4900e-07	3.0234e-06	9.4211e-27	9.7409e-46	1.9642e-44	1.0034e-04	4.5207e-04	0.6229
	C154	7.9657e-47	0.3284	0.0029	0.0210	1.2633e-56	3.8155e-82	1.2473e-81	3.5897e-06	6.1385e-05	0.4085
	C155	1.4700e-46	0.2252	7.8893e-09	1.2239e-07	1.1424e-79	1.5780e-112	5.1717e-114	1.2242e-08	4.1886e-07	0.4068
	C156	1.8595e-10	0.0112	2.5311e-09	1.3387e-10	4.3572e-23	4.6937e-52	2.4326e-55	2.6401e-05	1.6591e-06	0.5494
	C157	2.0196e-07	5.0250e-08	1.0309e-20	1.4497e-23	2.5649e-33	1.0076e-63	1.1888e-70	1.7001e-05	1.1183e-06	0.7563
	C158	2.0997e-22	0.0305	2.2861e-07	2.3096e-06	2.4202e-45	4.9186e-89	2.8140e-89	2.1364e-04	0.0018	0.4575
	C159	8.7688e-13	1.7102e-15	2.2168e-34	4.6619e-34	2.5087e-65	1.1775e-101	1.2545e-110	2.0083e-07	1.3562e-06	0.3967
	C1510	1.3217e-09	1.6490e-32	1.3245e-34	2.4305e-29	4.0943e-28	7.7047e-32	1.6440e-23	0.4785	0.2809	0.0772
	C1511	1.1725e-07	1.1637e-13	1.1522e-12	1.7785e-10	1.6238e-69	2.5803e-69	5.9312e-81	0.6795	0.1298	0.2723

PR

**ANOVA et T-test pour RH**

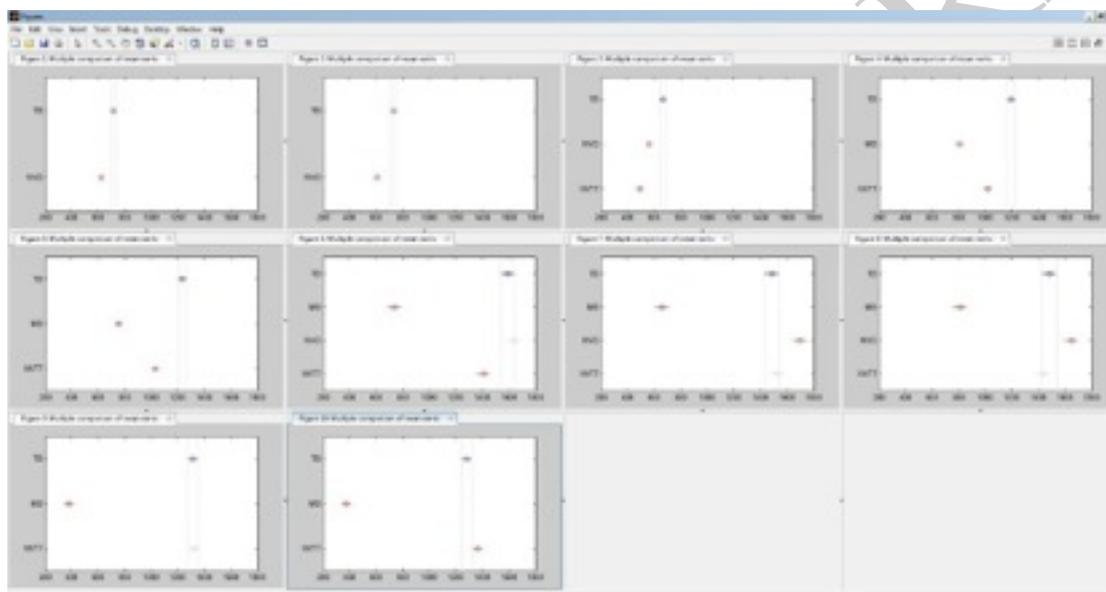


		IS/MS	IS/NVD	IS/NVI	IS/NVTI	MI/NVD	MI/NVI	MI/NVTI	NVD/NVI	NVD/NVTI	NVI/NVTI
pValue with Two Sample t test on RH	C851	5.0592e-20	2.8886e-04	4.9041e-18	7.5891e-15	9.2779e-54	2.0101e-98	4.1857e-90	7.4209e-20	3.5941e-07	0.2732
	C852	9.8119e-23	0.0050	4.0004e-11	1.8989e-09	8.7497e-43	9.7737e-76	5.4913e-73	3.3357e-07	7.8055e-06	0.4766
	C853	7.8405e-17	0.1380	2.1634e-07	1.2700e-06	8.7438e-29	4.9140e-52	3.1967e-50	3.1643e-05	1.0003e-04	0.6731
	C854	2.1252e-55	0.0034	1.4481e-04	0.0012	4.7174e-07	4.1555e-103	6.2976e-102	1.4157e-06	2.3926e-05	0.4840
	C855	2.1299e-51	0.1097	6.9840e-11	1.1241e-09	1.2268e-89	4.2079e-133	6.5364e-133	1.0389e-09	2.3217e-08	0.5117
	C856	1.4442e-21	0.2748	2.7005e-06	2.1258e-07	2.8741e-31	1.7915e-58	9.2653e-62	1.2929e-04	1.2650e-05	0.5697
	C857	2.6715e-17	8.4005e-04	1.5216e-11	5.0469e-12	9.4464e-37	4.8813e-63	3.3264e-66	4.9284e-04	3.1762e-04	0.9528
	C858	4.4737e-35	0.0067	4.2015e-07	3.7944e-06	4.7489e-55	7.0676e-83	2.7309e-82	7.1912e-04	0.0040	0.5586
	C859	1.9570e-22	1.1504e-05	1.2461e-16	2.7789e-15	1.4628e-57	9.1117e-94	3.3084e-93	2.2099e-05	1.7222e-04	0.5638
	C8510	0.1776	3.7523e-14	2.0887e-15	4.3376e-12	4.8179e-27	6.5315e-30	2.7427e-24	0.8138	0.4158	0.2857
	C8511	1.8177e-28	1.2062e-06	2.6017e-05	4.6284e-04	2.7318e-64	4.4432e-61	3.8570e-56	0.4693	0.1432	0.4553

PR

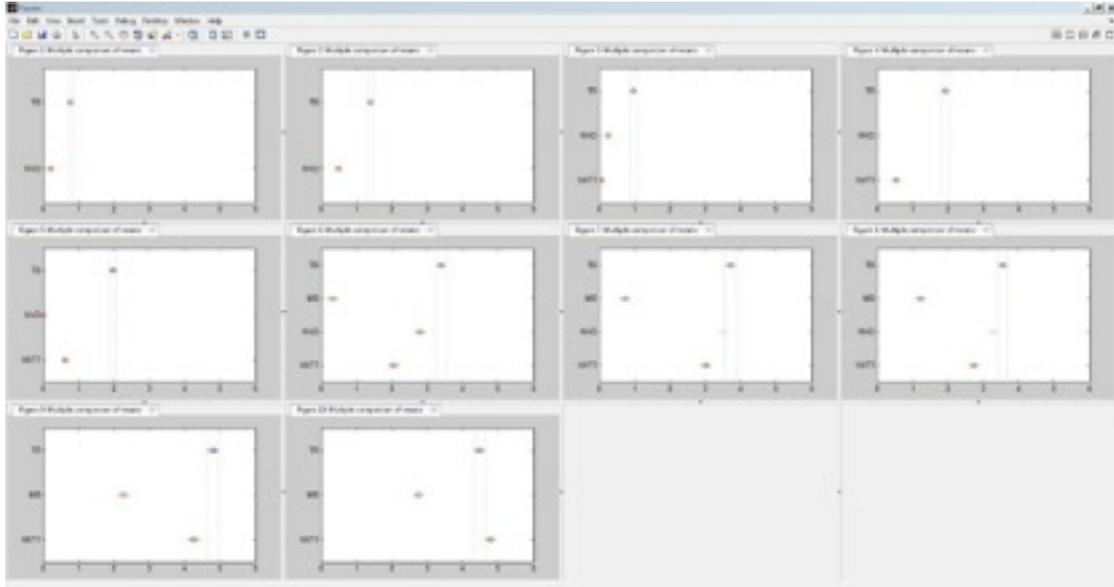
**ANNEXE E : RÉSULTATS BRUTES DES TESTS DES MESURES DES  
BÂTIMENTS À VIDE AU NIVEAU DES CONDITIONS DE CONSERVATION  
HYGROMÉTRIQUE POUR LES OIGNONS**

**Kruskal-Wallis et Wilcoxon Rank Sum Test pour T**



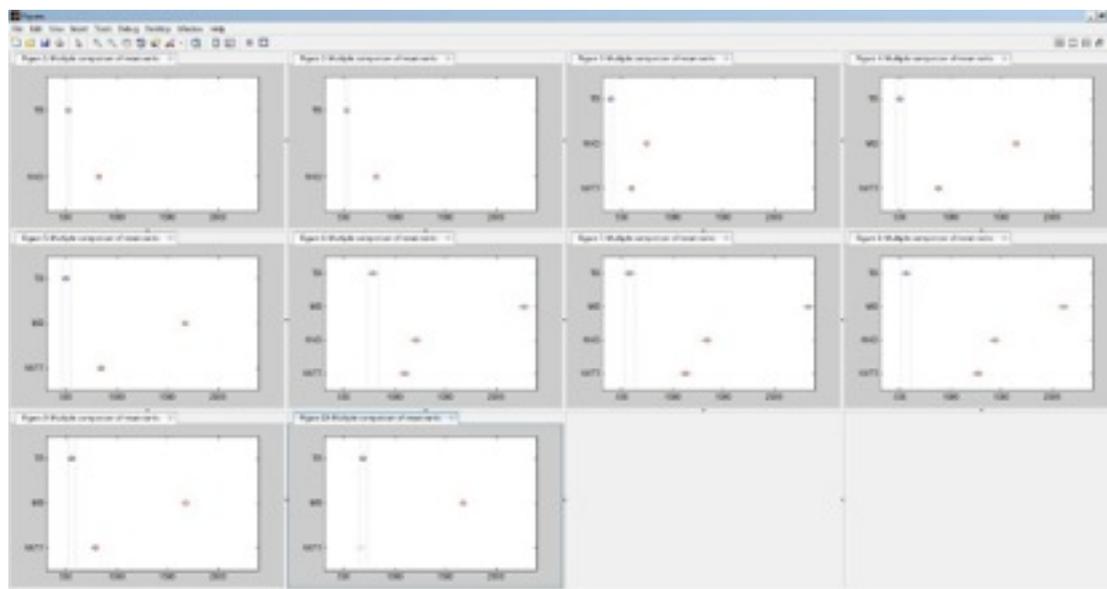
		TB/MB	TB/NVD	TB/NVTT	MB/NVD	MB/NVTT	NVD/NVTT
pValue with Wilcoxon Rank Sum Test on T	C151		6.6342e-08				
	C152		1.4774e-11				
	C153		2.4075e-08	1.5572e-21			7.3539e-07
	C154a	5.9903e-50		6.3307e-13		1.1319e-25	
	C154b	2.2921e-74		3.1101e-16		4.3152e-47	
	C251	6.4251e-68	0.1490	4.1265e-08	3.8968e-122	3.9161e-78	6.5555e-11
	C252	5.6902e-48	0.1953	0.5589	1.7930e-156	9.3463e-128	2.3270e-08
	C253	1.7053e-35	0.4318	0.0949	6.6269e-99	3.8510e-67	3.3186e-12
	C254a	1.6374e-36		0.1143		1.0427e-58	
	C254b	1.4741e-18		0.0467		2.9638e-72	

**ANOVA et T-test pour T**



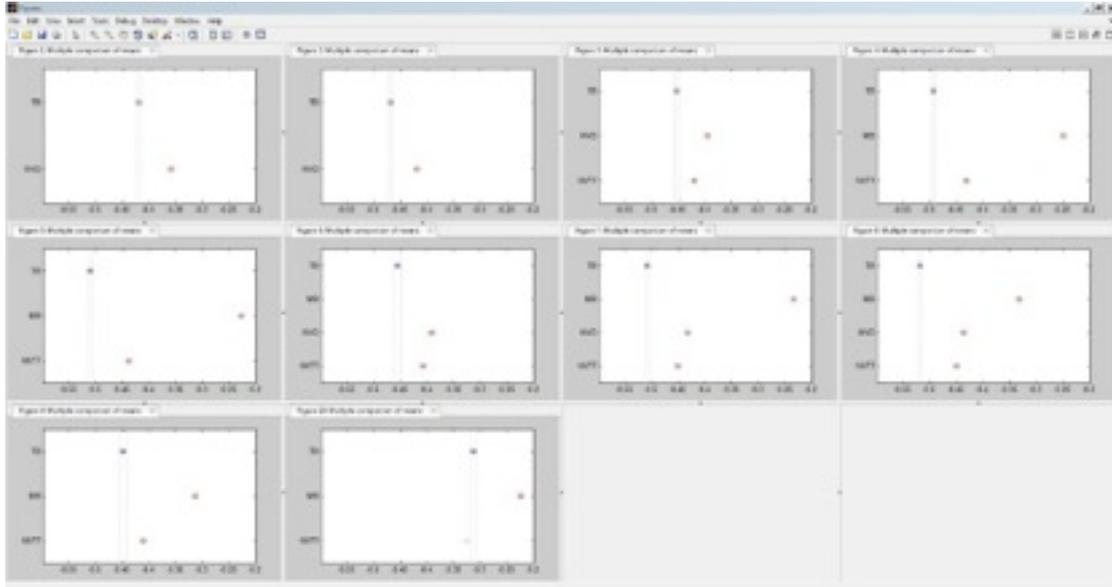
		TB/MB	TB/NVD	TB/NVTT	MB/NVD	MB/NVTT	NVD/NVTT
pValue with Two Sample t-test on T	C1S1		6.6743e-14				
	C1S2		5.5038e-29				
	C1S3		2.0533e-15	6.4025e-27			3.0498e-09
	C1S4a	1.8225e-61		3.0562e-32		1.6808e-36	
	C1S4b	3.2466e-75		6.9799e-33		4.6210e-42	
	C2S1	6.8065e-109	7.2524e-05	1.4225e-19	4.9473e-139	6.1524e-87	9.4221e-11
	C2S2	1.1756e-90	0.2060	5.9091e-06	7.5457e-197	4.9920e-144	1.0468e-06
	C2S3	1.5816e-57	0.0514	5.5499e-09	2.6686e-116	9.0196e-66	4.7322e-11
	C2S4a	4.3150e-48		5.1515e-04		1.1755e-66	
	C2S4b	5.1520e-29		0.0242		2.5210e-95	

**Kruskal-Wallis et Wilcoxon Rank Sum Test pour RH**



		TB/MB	TB/NVD	TB/NVTT	MB/NVD	MB/NVTT	NVD/NVTT
pValue with Wilcoxon Rank Sum Test on T	C1S1		2.4145e-46				
	C1S2		2.1655e-42				
	C1S3		3.4526e-46	2.1622e-19			7.3916e-12
	C1S4a	5.3416e-221		3.1795e-61		2.6505e-180	
	C1S4b	5.0177e-221		6.6680e-60		1.9472e-218	
	C2S1	2.0041e-199	4.1956e-39	1.7337e-21	1.3420e-181	7.5380e-190	0.0015
	C2S2	4.7772e-221	3.1892e-136	2.6338e-59	5.8820e-213	4.2714e-213	2.4325e-08
	C2S3	3.1197e-211	1.6966e-141	1.5536e-70	5.9327e-92	3.0237e-101	3.9812e-04
	C2S4a	5.0333e-114		7.2304e-28		5.5531e-67	
	C2S4b	1.3506e-41		0.3124		1.5778e-66	

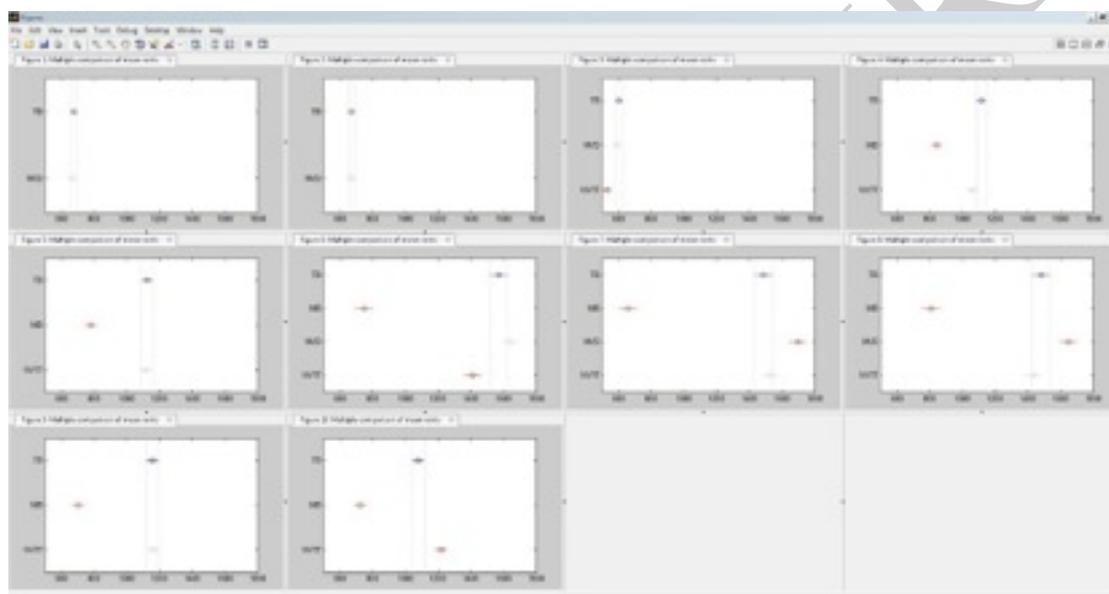
**ANOVA et T-test pour RH**



		TB/MB	TB/NVD	TB/NVTT	MB/NVD	MB/NVTT	NVD/NVTT
pValue with Two Sample t-test on T	C151		1.1374e-51				
	C152		1.2452e-44				
	C153		2.5736e-58	8.7813e-23			1.7968e-11
	C154a	0,00		3.8385e-86		1.0121e-287	
	C154b	0,00		4.0170e-82		0,00	
	C251	0,00	8.4818e-37	1.2224e-20	2.1713e-276	3.2303e-289	0.0013
	C252	0,00	4.3258e-188	2.4442e-92	0,00	0,00	6.5662e-09
	C253	0,00	9.7571e-184	3.7457e-102	2.0953e-123	8.9833e-132	6.4314e-05
	C254a	2.4341e-113		1.5949e-14		4.2757e-75	
	C254b	9.5627e-46		0.0501		1.3477e-77	

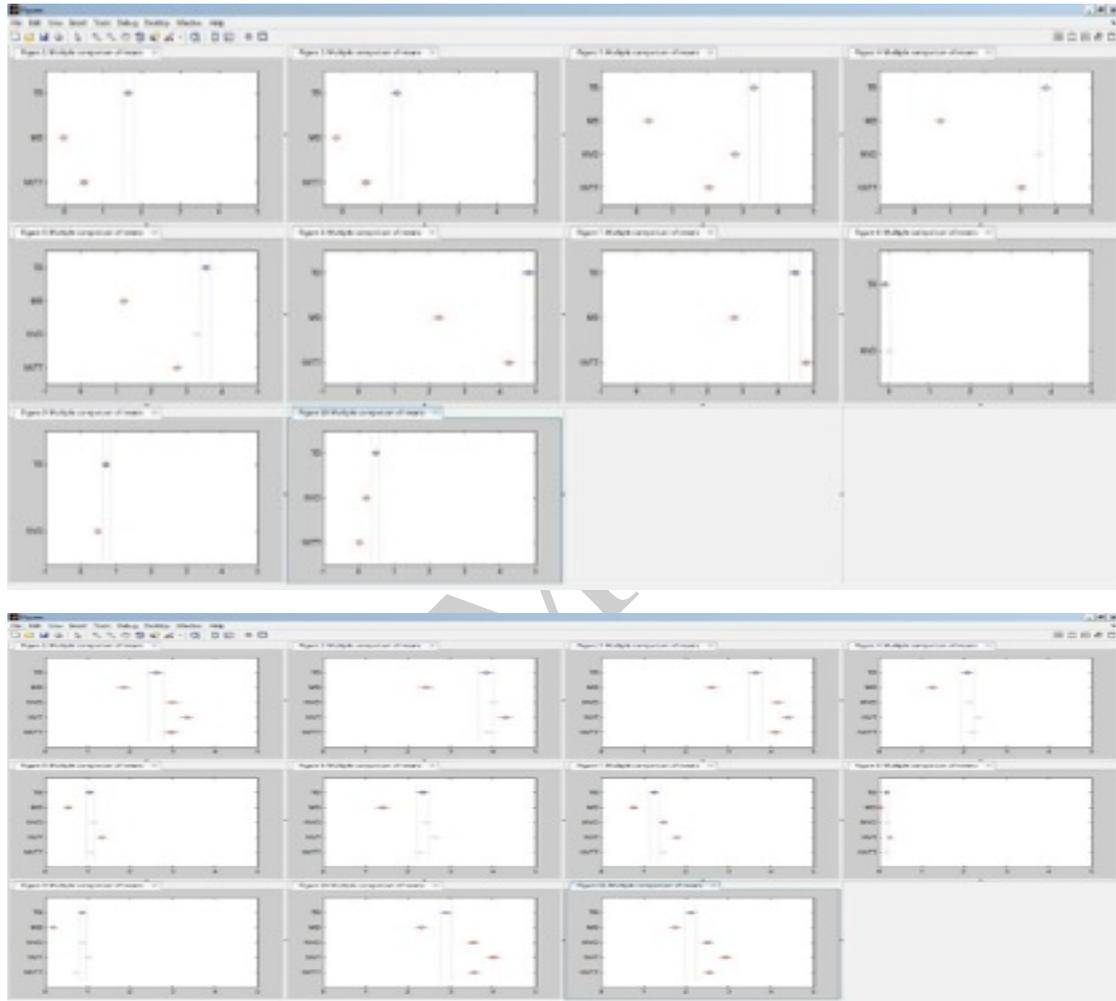
**ANNEXE F : RÉSULTATS BRUTES DES TESTS DES MESURES DES  
BÂTIMENTS À VIDE AU NIVEAU DES CONDITIONS DE CONFORT  
THERMIQUE POUR LES HUMAINS**

**Kruskal-Wallis et Wilcoxon Rank Sum Test pour T**

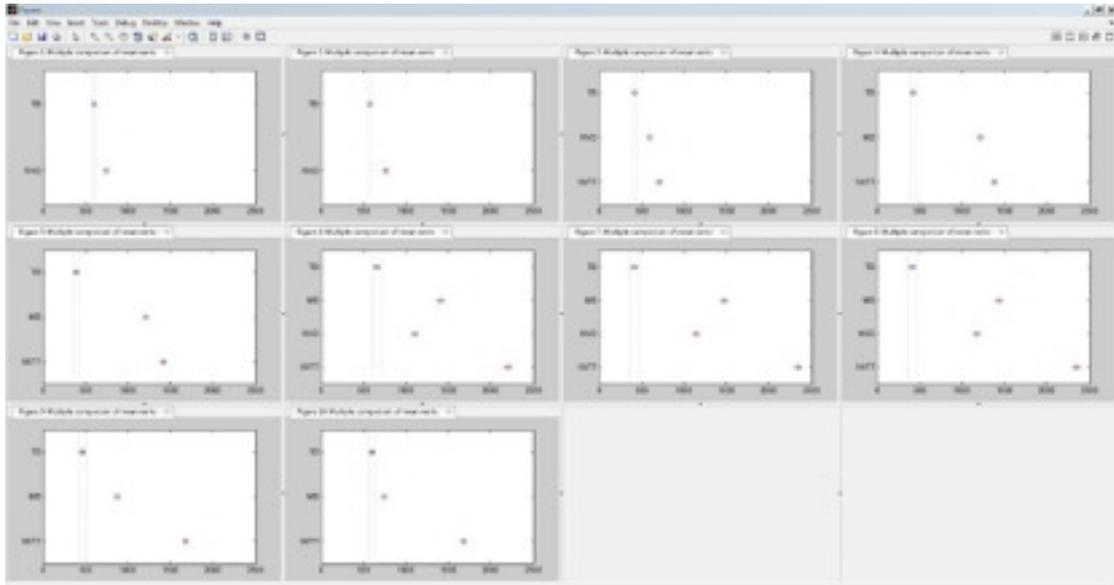


		TB/MB	TB/NVD	TB/NVTT	MB/NVD	MB/NVTT	NVD/NVTT
pValue with Wilcoxon Rank Sum Test on T	C1S1		0.5778				
	C1S2		0.9676				
	C1S3		0.3165	0.0022			1.4063e-04
	C1S4a	1.0245e-17		0.0017		3.8831e-24	
	C1S4b	1.0267e-21		0.0153		5.6611e-59	
	C2S1	1.1028e-57	1.3067e-21	4.4659e-07	3.8968e-122	3.9161e-78	6.5555e-11
	C2S2	5.6902e-48	2.9140e-16	0.5589	1.7930e-156	9.3463e-128	2.3270e-08
	C2S3	1.7053e-35	0.2367	0.0949	6.6269e-99	3.8510e-67	3.3186e-12
	C2S4a	1.6374e-36		0.1143		1.0427e-58	
	C2S4b	1.4741e-18		0.0467		2.9638e-72	

**ANOVA et T-test pour T**

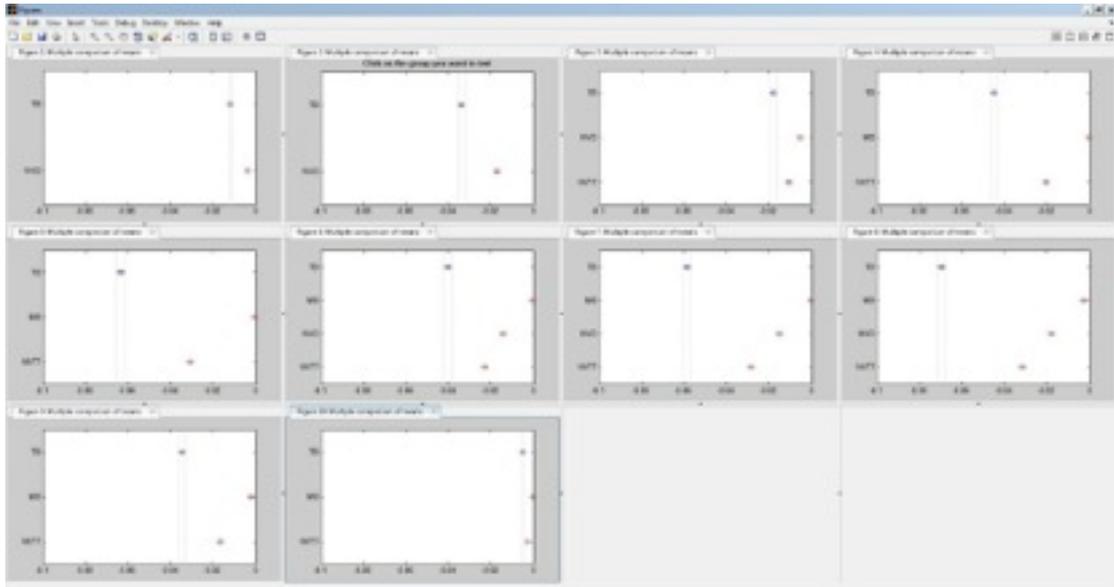


**Kruskal-Wallis et Wilcoxon Rank Sum Test pour RH**



		TB/MB	TB/NVD	TB/NVTT	MB/NVD	MB/NVTT	NVD/NVTT
pValue with Wilcoxon Rank Sum Test on T	C151		3.3247e-18				
	C152		1.0706e-21				
	C153		1.0813e-20	2.4454e-08			5.2905e-04
	C154a	3.7710e-209		8.5046e-52		1.9147e-97	
	C154b	9.2181e-220		1.5254e-54		1.5932e-85	
	C251	4.7204e-145	3.4473e-47	1.1288e-24	4.2999e-51	7.8406e-67	1.9214e-07
	C252	4.3268e-247	6.1529e-138	4.7225e-59	2.3149e-69	1.2730e-88	6.4501e-17
	C253	1.2202e-225	2.0998e-144	6.9037e-71	1.8782e-36	3.3972e-56	4.8244e-15
	C254a	1.4959e-107		4.8811e-33		5.7311e-26	
C254b	5.7664e-36		2.3187e-05		1.8135e-21		

**ANOVA et T-test pour RH**



		TB/MB	TB/NVD	TB/NVTT	MB/NVD	MB/NVTT	NVD/NVTT
pValue with Two Sample t-test on T	C1S1		5.5519e-21				
	C1S2		1.9535e-24				
	C1S3		8.9560e-23	5.1558e-07			2.1806e-06
	C1S4a	1.8707e-205		1.2096e-51		9.5920e-87	
	C1S4b	2.1492e-260		3.8935e-50		3.0895e-79	
	C2S1	6.7809e-121	2.7387e-43	5.9577e-17	2.2388e-46	9.3087e-59	7.7902e-11
	C2S2	0,00	2.6090e-173	1.3585e-63	2.6242e-66	7.6898e-86	6.2710e-10
	C2S3	0,00	6.9063e-188	4.0887e-81	9.1661e-51	4.0130e-76	6.6024e-58
	C2S4a	1.6958e-113		9.2811e-27		2.6511e-39	
	C2S4b	8.7607e-30		2.4722e-05		2.0728e-17	