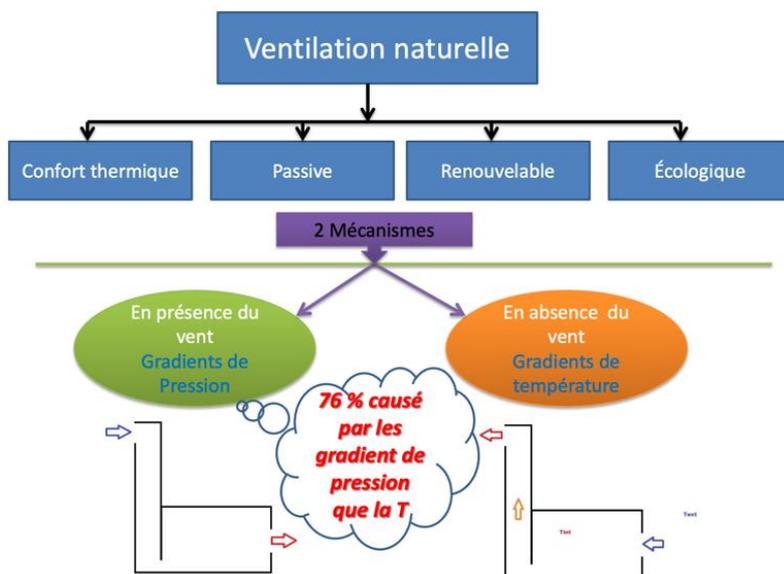


**Nasreddine Sakhri :**

Je suis très heureux d'être avec vous aujourd'hui pour parler d'un élément fondamental aussi bien dans l'architecture vernaculaire et traditionnelle que dans l'architecture bioclimatique : le vent. Cette intervention portera sur l'échelle du bâtiment et présentera les résultats des recherches du laboratoire ENERGARID (*Laboratoire d'études des systèmes énergétiques en zones arides*), où je travaille en tant que chercheur et maître-assistant. Les recherches se concentrent sur l'amélioration du confort thermique dans les régions arides en utilisant des techniques renouvelables, sans consommation d'énergie.



La ventilation naturelle est une technique qui assure le confort thermique d'une façon passive, renouvelable et immuable en utilisant deux mécanismes : en présence du vent, par les gradients de pression et en absence du vent par les gradients de température. 76% des forces « motrices » sont issues des gradients de pression. Pour les gradients de pression, la différence de pression [ $\Delta P$ ] se forme lorsque le vent rencontre une structure,

créant une zone de surpression en amont, une dépression en aval.

Plus on augmente la  $\Delta P$ , plus on aura de ventilation naturelle. Les gradients de température sont désignés le plus souvent sous le nom de tirage thermique. Ils représentent la différence entre la température de l'air qui se trouve dans la partie la plus basse (froide) et celle de la partie la plus haute (chaude). Elle crée un écoulement de l'air : le tirage thermique. La différence de température, c'est la force qui génère l'économie de l'air à l'intérieur de la structure.

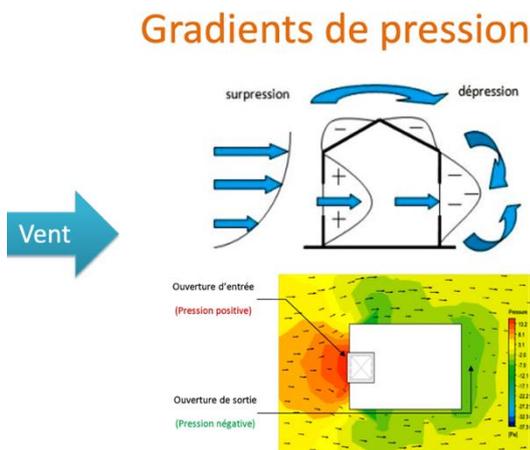


Fig.1. Gradients de pression causés par le vent sur une structure

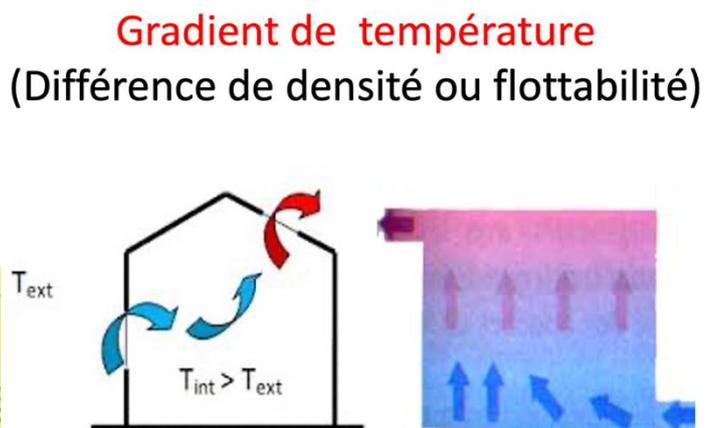


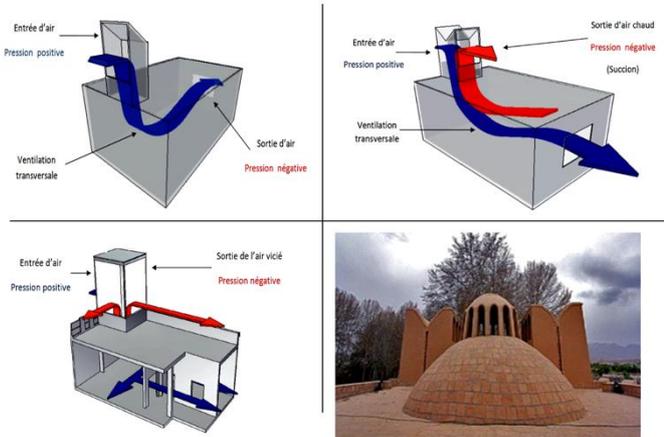
Fig.2. Tirage thermique à l'intérieur d'une structure.

# Techniques renouvelables utilisées numériquement et expérimentalement

## La tour à vent



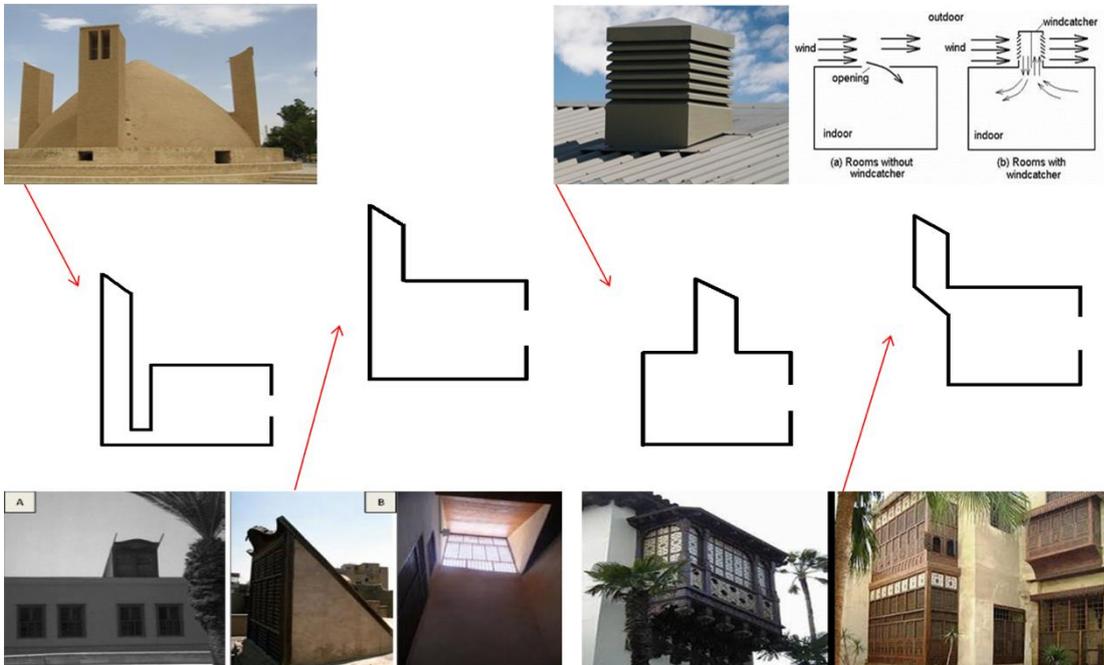
## Types de tour à vent



La tour à vent est un élément architectural qui définit la région du Moyen-Orient, notamment les pays du Golfe. Elle peut prendre une forme traditionnelle ou moderne. Il existe plusieurs types de tours à vent : mono-face, double face, à plusieurs faces, circulaire ou triangulaire... Cela dépend de la configuration et de la région où se trouve la tour à vent.

Plusieurs modèles ont été étudiés afin d'augmenter la Delta P entre l'amont et l'aval de la structure.

## Modèles étudiés



## Delta P au niveau macro

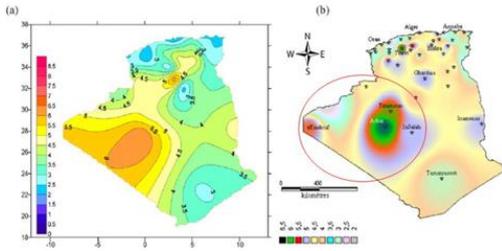
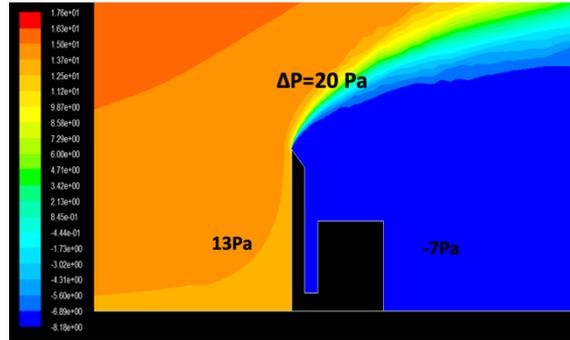


Fig. La carte des vent annuelle en Algérie à 10 m de hauteur

Nous avons essayé d'augmenter la Delta P en Algérie, plus particulièrement dans la zone de Béchar. La moyenne de vitesse du vent y est de l'ordre de 4 à 4,5 m/s.

Un premier modèle conçoit une Delta P de l'ordre de 20 Pascals (PA), 21,5 PA pour le deuxième, et 18 PA pour le troisième modèle qui utilise les tours à vent modernes installées au milieu de la structure. Le quatrième modèle proposé par le laboratoire atteint 21PA.



Fig, Pression total de l'air extérieure autour modèle traditionnelle

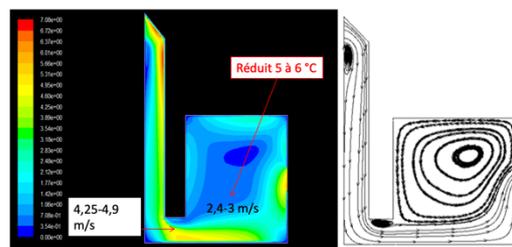
## Écoulement d'air à l'intérieur de la structure

Vitesse de l'air intérieure (ms <sup>-1</sup> )	Reduction en température (°C)
0,1	0
0,3	1
1	3
3	6
6,5	8

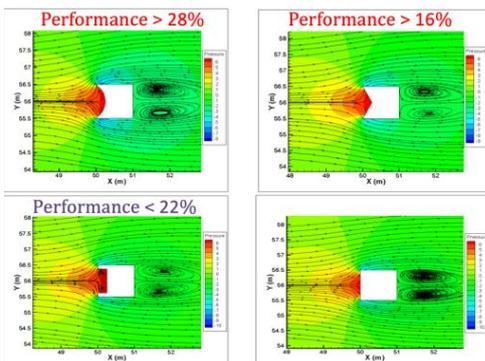
**Il existe une relation entre la vitesse et du vent et la réduction de température.** A une vitesse de vent de 6,5 m/s, la température peut diminuer jusqu'à 8°. Plus la vitesse du vent augmente, plus grand est le rafraîchissement.

Tab. 1 Relation entre la vitesse de l'air et la réduction en température [René vottone, 1998].

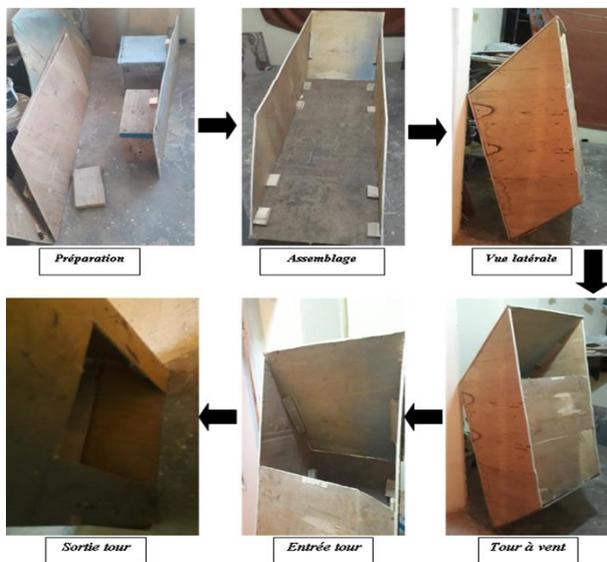
Pour le premier modèle, la vitesse d'entrée du vent au niveau de la tour est de 3m/s, permettant une diminution de 5° à 6°. Une diminution similaire est notée pour le deuxième modèle. La tour à vent moderne du troisième modèle descend à 3°. Quant au quatrième, modèle, il peut réduire jusqu'à 7°.



Fig, vitesse de l'air intérieur et lignes de courant- modèle traditionnelle



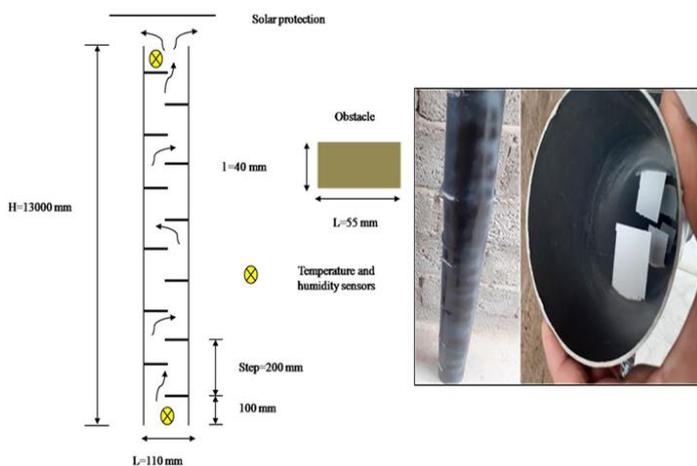
Dans ce même objectif d'augmenter la Delta P entre l'amont et l'aval, plusieurs modèles ont été comparés : la forme circulaire, la forme triangulaire, la forme en U. La performance de la technique augmente de 28% lorsque la forme est circulaire, 16% pour la forme triangulaire.



À partir de ces études, nous avons construit une tour à vent dans un cadre expérimental.

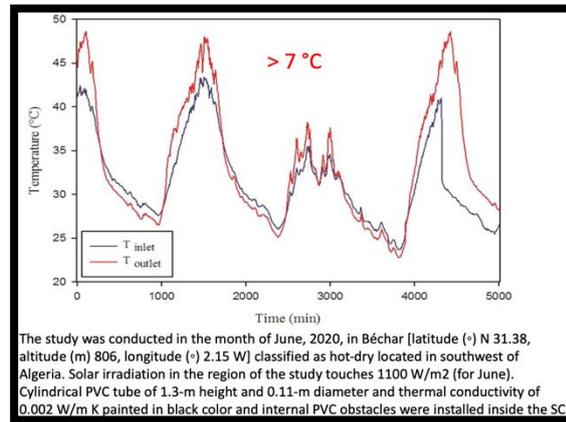
**Pierre Massis :** Pour recontextualiser, Béchar est situé dans un territoire aride où les températures estivales sont très chaudes, et les températures hivernales très froides. Votre méthodologie est intéressante car vous avez travaillé à la fois sur le rafraîchissement en été et le réchauffement en hiver. Cette vue globale et les études au Moyen-Orient sur les badguirs vous ont permis d'expérimenter des tours à vent, vous amenant par exemple à positionner les cheminées en différents endroits pour diminuer la température des courants aériens. Dans une deuxième partie qui porte sur le réchauffement, la nuit ou en hiver, entre en jeu la cheminée solaire.

**Nasreddine Sakhri :** Exact. La cheminée solaire est une technique simple qui recourt à un tuyau en PVC noir de 1 m à 1m30, et à une section transversale de 110 mm dans le but d'augmenter les gradients de température. Plus la température de l'air évacué de la structure augmente, plus fort sera le tirage thermique et donc plus frais sera l'air qui entre par les ouvertures les plus basses.



L'Algérie et Béchar disposent d'un gisement très important d'énergie solaire dont nous avons tenté de tirer profit grâce à une simple structure (ci-contre) : un tuyau en PVC dont l'intérieur est rempli d'obstacles, appelés chicanes, afin de diminuer la vitesse du vent et s'assurer que l'air s'expose au maximum aux rayons solaires.

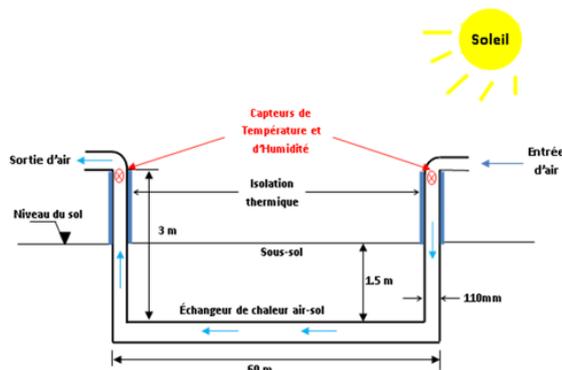
Nous sommes parvenus à une différence de 7° au niveau de la cheminée entre l'air entrant dans la structure et l'air sortant. Les effets du tirage thermique au niveau du bâtiment seront dès lors plus conséquents.



### Échangeur de chaleur air-sol

En troisième partie, nous avons souhaité tirer bénéfice de l'énergie géothermique et avons réalisé ce qu'on appelle un échangeur de chaleur air-sol. Quatre modèles ont été utilisés pour cette technique.

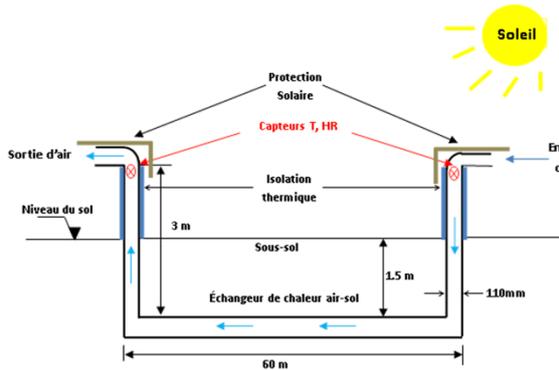
#### 1-Échangeur de chaleur air-sol sans protection solaire



Heures du jour	$\Delta T (T_{inlet} - T_{outlet}) (°C)$								Régime
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
00	--	-3,65	4,575	4,325	-5,78	-5,33	-4,31	-2,76	Chauffage
01	--	-4,85	4,775	4,775	-6,56	-4,44	-6,01	-5,39	
02	--	-3,542	3,12	-2,96	-7,092	1,292	-3,48	-5,3	
03	--	-0,075	0,53	-6,03	-7,04	-2,62	-5,32	-0,59	
04	--	-4,525	3,41	-5,63	-7,85	-5,76	-6,26	0,975	
05	--	-5,36	2,925	-5,26	-5,883	-9,06	-7,61	-3,658	
06	--	-5,825	2,592	-4,941	-9,41	-9,275	-5,33	-4,775	
07	--	-6,775	2,53	-6,325	-9,11	-9,65	-5,46	-6,567	
08	--	-7,775	4,883	-3,3	-2,937	-9,96	-8,56	-7,11	
09	--	5,06	5,06	-5,13	3,2	-4,78	-3,142	-0,63	
10	--	0,008	5,658	-7,48	9,483	9,092	0,6	0,42	
11	--	9,125	5,02	-5,71	11,93	19,26	-2,68	7,025	
12	--	9,6	4,56	0,966	7,25	9,933	0,42	1,825	
13	--	8,908	4,075	6,442	5,725	4,75	-0,883	1,95	
14	--	6,758	3,308	8,375	5,166	3,85	2,33	1,6	
15	--	6,93	2,56	8,642	4,792	3,36	3,775	-2,76	
16	2,2	4,116	2,45	7,51	4,7	3,51	3,066	--	
17	0,125	2,166	2,2	4,542	3,55	2,758	2,575	--	
18	-2,383	-0,41	2,7	-0,53	0,25	0,44	2,442	--	
19	-2,383	-1,9	5,83	-2,68	-2,07	-3,1	-1,72	--	
20	-2,508	-1,125	5,583	-4,933	-3,1	-3,22	-3,93	--	
21	-2,508	-1,183	5,86	-4,56	-4,16	-2,62	-3,49	--	
22	-2,025	0,6	5,91	-4,245	-5,7	-3,508	-1,983	--	
23	-2,6	3,242	5,9	-5,52	-5,13	-4,14	-1,48	--	

Le premier modèle, le plus simple, est un échangeur de chaleur air-sol sans protection solaire, seulement équipé de protections thermiques au niveau des parties exposées à l'extérieur. L'entrée d'air est orientée vers le sens des vents dominants, soit au sud-ouest pour Béchar. Le dispositif échangeur de chaleur air-sol donne deux modes. Lorsque la température extérieure hivernale avoisine les 5°, il se crée un préchauffage augmentant la température jusqu'à près de 10°. Et lorsque la température extérieure augmente, l'échangeur air-sol passe à un mode de refroidissement et on gagne une diminution allant jusqu'à près de 12°. Ce système travaille dans la même journée comme système de chauffage la nuit et de refroidissement le jour avec pour référence la température de l'air extérieur.

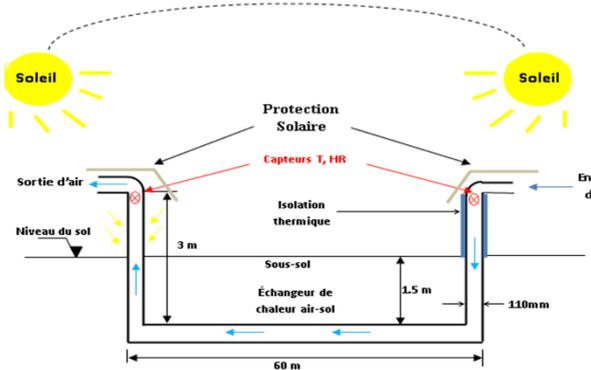
## 2-Échangeur de chaleur air-sol avec protection solaire des partie supérieures



Heures du jour	$\Delta T (T_{inlet} - T_{outlet}) (^\circ C)$								Régime
	Jours								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
00	--	-3,97	-4,1	-3,683	-3,13	-2,68	-3,192	-3,528	Chauffage
01	--	-4,51	-4,33	-4,11	-3,7	-3,142	-3,07	-4,13	
02	--	-4,93	-4,85	-4,47	-4,2	-3,17	-3,72	-4,7	
03	--	-4,683	-4,742	-4,783	-4,383	-3,292	-4,23	-4,87	
04	--	-5,57	-5,42	-4,917	-4,958	-2,44	-4,842	-5,4	
05	--	-6,01	-6,15	-5,33	-4,93	-2,56	-5,29	-5,38	
06	--	-5,975	-6,425	-5,325	-5,108	-3,62	-5,775	-5,07	
07	--	-6,16	-6,63	-5,46	-5,325	-4,22	-6,13	-5,5	
08	--	1,63	-0,942	3,47	-3,066	-2,642	-2,76	2,591	
09	--	10,842	7,591	5,05	2,76	3,542	5,27	12,46	
10	--	12,558	11,4	5,917	5,492	9,43	3,8	9,05	
11	--	9,975	11,68	11,33	11,1	0,8	6,66	12,46	
12	--	8,225	7,31	9,583	9,4	-0,3	8,256	9,05	
13	--	5,308	4,542	7,341	3,9	1,47	8,44	11,72	
14	--	5,283	4,65	3,875	0,32	5,175	5,875	11,608	
15	--	4,458	4,7	2,992	-3,175	3,15	4,775	9,11	
16	1,209	2,983	0,17	-5,9	-7,6	-1,25	-1,12	-3,528	
17	-0,15	-1,53	-4,942	-9,35	7,725	-8,5	-8,325	--	
18	-3,53	-0,075	-0,3	-1,06	-1,092	-0,85	-0,6	--	
19	-0,7	-1,65	-0,21	0,44	1,2	0,17	-0,07	--	
20	-0,658	-2,122	-1,283	0,08	0,292	-0,57	-0,97	--	
21	-0,75	-2,792	-1,783	-0,57	-0,375	-1,3	-1,67	--	
22	-1,725	-2,52	-2,6	-2,017	-1,36	-2,042	-2,83	--	
23	-2,966	-4,142	-3,142	-2,7	-2,16	-2,71	-2,95	--	

Le deuxième modèle utilise des protections solaires dans la partie supérieure. Le mode chauffage en saison hivernale atteint les 9° pour un refroidissement allant jusqu'à 12,46°.

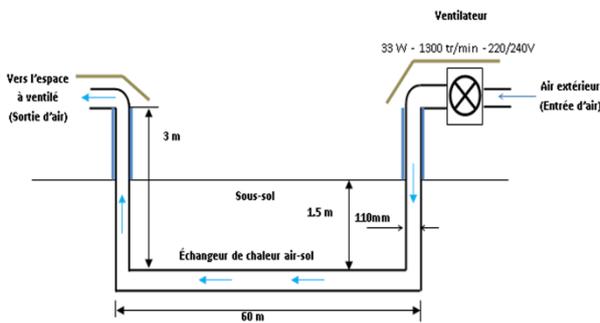
## 3-Échangeur de chaleur air-sol avec cheminée solaire



Heures du jour	$\Delta T (T_{inlet} - T_{outlet}) (^\circ C)$								Régime
	Jours								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
00	--	-3,11	-2,57	-2,6	-3,35	-3,2	-1,1	-4,15	Chauffage
01	--	-3,3	-2,71	-3,8	-3,84	-3,89	-0,675	-3,95	
02	--	-3,46	-3,3	-4,725	-3,77	-3,84	1,275	0,791	
03	--	-2,9	-3,95	-4,65	-4,36	-3,92	1,91	-1,3	
04	--	-3,32	-3,76	-4,7	-4,75	-4,1	2,72	-1,925	
05	--	-4,5	-4,025	-4,8	-5,125	-4,45	3,06	1,56	
06	--	-3,03	-4,275	-3,4	-4,42	-4,24	0,72	1,92	
07	--	0,5	-5,3	-5,53	-4,44	-4,35	4,4	-2,99	
08	--	-2,28	-4,21	-4,36	-3,7	-4,71	-3,675	0,98	
09	--	0,31	-2,94	-4,475	-1,25	-2,72	-3,16	6,31	
10	--	2,042	-3,97	-5,825	-2,12	0,49	1,6	-3,41	
11	--	5,12	4,45	-1,425	11,6	7,675	1,64	-4	
12	--	-3,775	7,55	4,7	5,7	7,11	2,63	--	
13	4,1	-5,8	-0,3	0,95	6,44	6,4	3,06	--	
14	3,3	-1,033	-4,6	-1,41	3,72	3,46	1,23	--	
15	3,042	1,63	-2	0,53	2,32	0,775	0,6	--	
16	-1	-4,075	-11,042	-1,7	-0,125	-0,84	0,46	--	
17	-2,86	-8,075	-14,1	-7,3	-4	-1,32	-2,275	--	
18	-0,41	-1,175	-0,275	0,025	-0,81	0,92	0,875	--	
19	0,9	0,85	1,025	1,41	0	1,5	0,51	--	
20	-0,142	0,925	0,42	0,883	1,84	2,21	1,49	--	
21	-1,083	0,342	0,25	0,91	1,94	0,5	-3,74	--	
22	-1,425	1,81	1,308	2,76	-0,65	-0,33	-3,96	--	
23	-2,12	-1,68	-1,76	-0,925	-2,67	-0,02	-2,65	--	

Le troisième modèle intègre un effet cheminée solaire au niveau de la sortie d'air qui sera connectée avec le bâtiment ou l'habitat. Le mode chauffage a gagné 2° pour l'air sortant du dispositif contre 11,04° en mode refroidissement 11°.

## 4-Échangeur de chaleur air-sol avec protection solaire et ventilateur extérieure

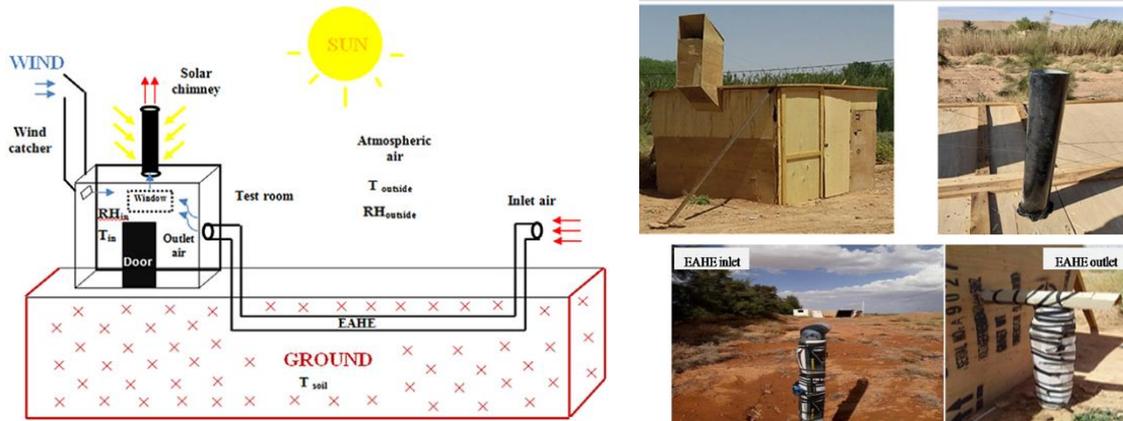


Heures du jour	$\Delta T (T_{inlet} - T_{outlet}) (^\circ C)$								Régime
	Jours								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
00	--	-10,6	-9,4	-9,06	-7,9	-5,225	-8,15	-8,075	Chauffage
01	--	-11,07	-10,36	-9,84	-8,625	-6,15	-8,225	-8,67	
02	--	-11,34	-11,11	-10,3	-9,54	-7,6	-9,73	-9,075	
03	--	-11,4	-11,42	-10,34	-9,89	-9,44	-9,925	-9,15	
04	--	-12,23	-11,77	-10,61	-9,84	-10,3	-9,925	-8,84	
05	--	-12,86	-12	-11,04	-10,56	-10,34	-10,14	-9,125	
06	--	-13,02	-12,2	-11,47	-10,38	-10,2	-10	-10,38	
07	--	-13,1	-12,27	-12,12	-11,3	-10,85	-9,8	-10,38	
08	--	-13,36	-12,43	-12,54	-11,03	-11,3	-10,82	-11	
09	--	-11	-9,71	-9,47	-9,01	-8,425	-10,74	-8,65	
10	--	-8,13	-6,49	-5,23	-4,52	-3,75	-6,95	-5,16	
11	--	-4,32	-2,14	-1,175	-0,825	-1,8	-2,725	-0,3	
12	--	-2,275	-0,4	1,7	0,775	-0,075	1,08	0,6	
13	--	-0,875	0,7	2,54	1,5	0,475	6,82	0,175	
14	--	-0,1	2,875	3,04	1,57	1,8	-5,58	--	
15	0,99	-0,175	3,51	2,65	1,825	2	6,625	--	
16	-3,3	-0,88	2,45	1,77	0,758	1,26	4,7	--	
17	-5,275	-2,8	-0,41	-0,7	-1,28	-0,38	1,97	--	
18	-4,35	-2,4	-0,51	0,39	-0,18	-1,62	0,98	--	
19	-5,29	-3,775	-2,45	-1,63	-1,96	-3,15	-3,175	--	
20	-6,65	-5,47	-4,25	-3,08	-3,21	-4,7	-4,27	--	
21	-8,04	-7,14	-6,36	-3,58	-4	-6,63	-5,65	--	
22	-9,19	-8,26	-7,13	-5,23	-4,88	-7,92	-6,76	--	
23	-9,74	-8,67	-8,63	-6,5	-5,625	-8,67	-7,375	--	

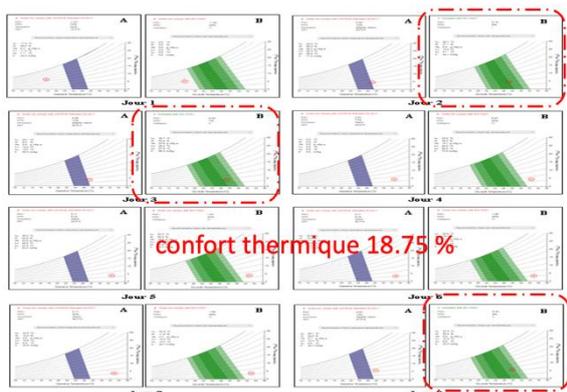
Tous ces modèles étudiés ne nécessitent pas de consommation d'énergie. Le dernier modèle intègre un petit ventilateur de 33 W, ce qui est peu. En période hivernale, le mode chauffage

gagne jusqu'à 13,36°, avec un régime stable par rapport aux autres modèles utilisés, contre 6° en mode refroidissement.

### Combinaison de plusieurs techniques



Tous ces éléments renouvelables, la tour à vent, la cheminée solaire et l'échangeur versant, ont été combinés dans la même structure à ventiler.



Selon les normes A-ASHRAE 55-2017 et B-EN-15251, le confort thermique sans utilisation des trois techniques renouvelables était à 18%. Y recourir permet d'atteindre les 50%, sans aucune intervention, sans aucune consommation d'énergie.

### Conclusion

- Le vent est un élément fondamental dans la conception bioclimatique comme il l'était dans l'architecture vernaculaire et traditionnelle.
- Il améliore significativement le confort thermique.
- Plusieurs techniques renouvelables basées sur le vent existent (tour à vent, cheminée solaire ou EAHE), faciles à utiliser avec un rendement important.

**Pierre Massis** : Merci Nasreddine, ce fut très instructif. Vous avez donc rassemblé trois technologies low tech dans un modèle expérimenté dans un bâtiment que vous avez conçu et dont vous avez surveillé très attentivement les constantes de températures. Cela, afin de mettre en œuvre trois modalités différentes : les deux premières sont la tour à vent (refroidissement) et l'échangeur air-sol (chauffage et refroidissement) avec une longueur de 60 m et une profondeur de 1m50 m. Cela signifie qu'il faut pouvoir disposer d'un peu de foncier, ce qui est un peu plus compliqué en ville. À l'extérieur de la ville ou éventuellement dans les jardins publics, on peut creuser, installer les dispositifs, surtout si c'est rafraîchi avec les arbres par-dessus, puis on recouvre avec de la terre ou du gravier. Les 60 m peuvent donc

être obtenus ; en sortie et en fonction de la température extérieure, il fera frais ou chaud. Le dernier dispositif est donc la cheminée solaire avec le PVC repeint en noir, les chicanes qui permettent de ralentir le vent, le soleil qui réchauffe le dispositif, et le tout arrive dans la maison. Vous m'avez dit avoir construit une petite maison de référence qui permettait de vérifier si cela fonctionnait correctement, pouvez-vous donner quelques précisions sur la manière dont a été conçue l'expérience ?

**Nasreddine Sakhri :** Pour la maison où les trois techniques ont été rassemblées, nous avons essayé d'approcher la réalité en reprenant les dimensions d'une chambre réelle, de forme cubique.

**Pierre Massis :** Les mesures de température ont-elles été faites sur plusieurs saisons ?

**Nasreddine Sakhri :** Oui, en période hivernale et estivale. Un grand problème à Béchar est que, situé en région aride, la température extérieure peut atteindre 55° en été. Cela entraîne un recours nécessaire à la climatisation, qui consomme énormément d'énergie. Améliorer le confort thermique jusqu'à 50% grâce à ces techniques renouvelables aisément réalisables, utilisables et intégrables à la structure permet de diminuer de 50% la facture d'électricité.

**Pierre Massis :** Le dispositif concentré est-il breveté et prêt à être industrialisé ? Ou est-il encore à l'état de recherche ?

**Nasreddine Sakhri :** Le laboratoire ENERGARID se concentre principalement sur la recherche et les publications. Tous les résultats sont publiés dans des journaux internationaux. La prochaine étape est encore à déterminer, nous travaillerons d'abord à l'amélioration des résultats.